Conférence sur la Sécurité Routière

Prévention des Risques et Aides à la Conduite

PRAC 2010

Paris
4 et 5 mai 2010

Bernard JACOB
Marie-Line GALLENNE

Conférence sur la Sécurité Routière

PRAC 2010

Prévention des Risques et Aides à la Conduite

Copyright © 2010 Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
Tous droits réservés. Cet ouvrage, ou toute partie de cet ouvrage, ne peut être reproduit sous quelque forme ou par tout moyen que ce soit, électronique ou mécanique, y compris la photocopie, l'enregistrement ou le scan, ou tout autre procédé de stockage ou de duplication, connu ou non ou à inventer, sans la permission écrite de l'éditeur.

Mention légale

Ni le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, ni les éditeurs, ni toute personne agissant pour leur compte, ne peut être tenu pour responsable de l'utilisation des informations contenues dans cet ouvrage.
Les points de vue exprimés dans cet ouvrage sont ceux des auteurs.

Remerciements

Les éditeurs remercient les membres des comités exécutifs et d'organisation, et les membres du comité scientifique pour la relecture des résumés et articles, et tous les auteurs pour leurs contributions de qualité.

Information disponible sur:
- Site web du LCPC: http://www.lcpc.fr/
- Site web de la conférence PRAC2010: http://prac2010.free.fr/

© LCPC Paris, France, 2010
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
58, Boulevard Lefebvre
75732 Paris Cedex 15
Tél : 01 40 43 50 00 - Fax : 01 40 43 65 20

Actes de la conférence PRAC2010 (Prévention des Risques et Aides à la Conduite)

Bernard Jacob & Marie-Line Gallenne

Paris, France: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées Publications, 2010

Mots clefs: Acceptabilité, accident, accidentologie, adhérence, aide à la conduite, alerte, boucles électromagnétiques, brouillard, capteur, carrefour, comportement, diagnostic, distance, dynamique du véhicule, eco-conduite, évaluation, fiabilité, freinage, giratoire, indicateur de risque, infrastructure, inspection, limite de vitesse, mesure, peloton, perte de contrôle, photométrie, piéton, pluie, poids lourd, position latérale, prévention des risques, renversement, rétroréflexion, risque, route, sécurité routière, signalisation horizontale, signalisation verticale, simulation, simulateur de conduite, sortie de route, systèmes coopératifs, systèmes de transports intelligents, trajectoire, usager vulnérable, véhicule, virage, visibilité, vitesse, voiture.

Keywords: Acceptability, Alert, Assessment, Bend, Behaviour, Braking, Car, Cooperative Systems, Crash, Curve, Diagnosis, Distance, Driving Assistance, Driving Simulator, Eco-driving, Evaluation, Fog, Hazard, Hazard Indicator, Hazard Mitigation, Heavy Vehicle, Highway, Inductive Loop, Infrastructure, Inspection, Intelligent Transportation Systems, Intersections, Lateral Position, Loss of Control, Measurement, Path, Pedestrian, Photometry, Platoon, Rain, Reliability, Retroreflectivity, Road Accident Research, Road Departure, Road marking, Road safety, Road sign, Road, Rollover, Roundabout, Sensor, Simulation, Skid Resistance, Speed, Speed Limit, Trajectory, Vehicle, Vehicle Dynamics, Visibility, Vulnerable Road User, Warning.

Actes

de la

Conférence sur la Sécurité Routière
PRAC 2010

Prévention des Risques et Aides à la Conduite

organisée par

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité

Paris, France
4 et 5 mai 2010

Bernard Jacob et Marie-Line Gallenne

Organisation

Comité Exécutif

Bernard Duhem (président)	PREDIT
Fleur Breuillin	MEEDDM / DRI
Bernard Cambou	INRETS
Marie-Claire de Franclieu	MEEDDM / DSCR
Pascal Fournier	ADF
Jean-François Janin	MEEDDM / DGITM / MTI
Pascal Lechanteur	MEEDDM / DGITM / DIT
Henri Vandamme	LCPC

Parrainages

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)
58 bd Lefèbvre, 75732 Paris Cedex 15, France
Tél. : 01 40 43 50 00
Fax : 01 40 43 65 20
www.lcpc.fr

Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (INRETS)
25, Avenue François Mitterrand, F-69675 Bron Cedex, France
Tél. : 04 72 14 23 00
Fax : 04 72 37 68 37
www.inrets.fr

Ministère de l'Energie, de l'Ecologie, du Développement durable et de la Mer (MEEDDM)
Direction de la Recherche et de l'Innovation (DRI)
Direction de la Sécurité et de la Circulation Routières (DSCR)
Direction Générale des Infrastructures, des Transports et de la Mer (DGITM)
www.developpement-durable.gouv.fr

Programme de recherche et d'innovation dans les transports terrestres (PREDIT)
www.predit.prd.fr

Comité scientifique

René Amalberti (président)	PREDIT4 - GO2
Xavier Apolinarski	CEA
Didier Aubert	LIVIC (LCPC/INRETS)
Jean- Marc Blosseville	MOVEO/INRETS
Fleur Breuillin	MEEDDM/DRI
Xavier Cocu	BRRC, Belgique
Christophe Desnouailles	SETRA
André-Gilles Dumont	EPFL, Suisse
Ralph Engel	PREDIT4
Hélène Fontaine	INRETS
Marie-Line Gallenne	LCPC
Denis Gingras	Université de Sherbrooke, Canada
Jean-Michel Hoc	IRCCYN, Psychotec
Bernard Jacob	LCPC
Claude Laurgeau	ENSMP
Daniel Lechner	INRETS
Marie-Madeleine Le Marc	CERTU
Yves Page	Fondation Sécurité Routière
Samuel Sellam	INRETS
Alain Somat	LAUREPS, Université de Rennes 2
Laurent Trassoudaine	LASMEA, Université Clermont-Ferrand

Comité d'organisation

Marie-Line Gallenne (animateur)	LCPC
Bernard Jacob (co-animateur)	LCPC
Fleur Breuillin	MEEDDM / DRI
Cécile Derouet	LCPC
Ralf Engel	PREDIT
Daniel Lechner	INRETS

Lieu de la conférence : FIAP JEAN MONNET - 30 Rue Cabanis, 75014 Paris.

Soutiens

	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie 20, avenue du Grésillé - BP 90406 49004 Angers Tel: 02 41 20 41 20 Fax: 02 41 87 23 50 www.ademe.fr
	Agence Nationale de la Recherche 212, rue de Bercy 75012 Paris Tel: 01 78 09 80 00 www.agence-nationale-recherche.fr
	Association pour le développement des techniques de transport, d'environnement et de circulation 38 bis avenue René Coty - 75014 Paris Tel : 01 45 24 09 09 Fax : 01 45 24 09 94 www.atec-itsfrance.net
	Conseil Général des Côtes d'Armor 11 Place du Général de Gaulle 22023 Saint-Brieuc Cedex 01 Tél : 02 96 62 62 22 Fax : 02 96 33 80 30 www.conseil-general.com/conseil-general/conseil-general-cotes-d-armor-departement-22.htm
	Fondation Sécurité Routière 2, rue de Presbourg 75008 Paris http://fondation-securite-routiere.org/
	ITS Bretagne (Systèmes de Transports Intelligents) 11 Place du Général de Gaulle 22023 Saint-Brieuc Cedex 01 Tél.: 02 96 77 32 22 Fax.: 02 96 77 32 23 www.itsbretagne.net
	Pôle Mov'eo Technopôle du Madrillet, 50 rue Ettore Bugatti 76800 St Etienne du Rouvray Tel: 02 35 65 78 20 Fax: 02 35 34 64 97 www.pole-moveo.org
	Surveillance Automatisée des Routes pour l'Information des conducteurs et des gestionnaires LCPC - Centre de Nantes, Route de Bouaye - BP 4129 44341 Bouguenais Cedex, France Tél : 02 40 84 59 35 www.sari.prd.fr

Table des matières

Organisation ..... *iv*
Avant-propos..... *1*
Préface..... *2*
Le Prédit… ..... *.3*
Tables rondes ..... *.5*

Conférences invitées

Pour une vision systémique du risque routier et de la recherche attenante
R. AMALBERTI..... *13*

Information au conducteur : bord de route ou embarqué ?
C. BALLE..... *17*

Evaluation du risque routier et valeur de la vie humaine ?
L. BAUMSTARK..... *19*

Les usagers vulnérables en situation de mobilité urbaine
C. MARIN-LAMELLET , S. SELLAM..... *21*

Session 1. Caractérisation du risque routier vis à vis de l'infrastructure

Outils d'évaluation de la visibilité nocturne et de l'éblouissement sur les routes non éclairées
E. DUMONT, R. BREMOND, K-B. CHRISTIANSON, D-S. GREENHOUSE..... *25*

Sur le diagnostic de la visibilité de la route
P. CHARBONNIER, J-P. TAREL..... *35*

Détection de conditions de visibilité réduite par caméra bord de voies
N. HAUTIERE, J. BOSSU, E. BIGORGNE, D. AUBERT..... *45*

Mise en œuvre d'une plate-forme expérimentale mobile de relevé laser pour le calcul de distances de visibilité
J. SENPAUROCA, J-E. DESCHAUD, F. GOULETTE..... *55*

Évaluation du risque en relation avec la visibilité - Proposition d'indicateurs de risque
L. PATTE *65*

Relation entre l'évolution de l'adhérence des revêtements routiers et l'accidentologie
V. CEREZO *75*

Détermination des vitesses limites de perte de stabilité des poids lourds en virage
M. BOUTELDJA, V. CEREZO *83*

Nouvelle approche pour l'estimation des forces d'impact d'un poids lourd
O. KHEMOUDJ, H. IMINE, M. DJEMAÏ..... *93*

Diagnostic de rupture d'un itinéraire : développement et perspectives d'utilisation
D. LECHNER, C. NAUDE, L. MENHOUR..... *95*

L'ISRI-Cam : une innovation utile à la démarche ISRI
G. BLANCHARD, R. CHASSANDE-MOTTIN, X. BERTRAND *115*

Estimation temps réel des efforts latéraux et de la dérive d'un véhicule, validation expérimentale
M. DOUMIATI, A. VICTORINO, A CHARARA, D. LECHNER *125*

Actualisation des formules françaises de vitesse V85 pratiquée en virage sur route à 2 voies
G. LOUAH, G. DUPRE, E. VIOLETTE *135*

Evaluation du risque de sortie de route pour l'aide à la conduite ou le diagnostic d'infrastructure
J. BRUNET, P. DA SILVA DIAS, G. YAHIAOUI ……..…145

Session 2. Caractérisation du risque routier vis à vis du comportement

Evaluation fiabiliste de la stabilité des trajectoires de véhicules en virage
G. REY, D. CLAIR, M. FOGLI, F. BERNARDIN……..159

Prédiction des trajectoires défaillantes en utilisant des techniques d'identification stochastique
A. KOITA, D. DAUCHER, M. FOGLI…….....…….167

Capteurs pour un observatoire de trajectoires
S. AUBIN, P. BRIAND, P. PLAINCHAULT, J-M. AUBERLET, T. BOSCH..……....177

Comparaison statistique de plusieurs systèmes de mesure du positionnement latéral des véhicules
C. LE BASTARD, P. BRIAND, P. LANDAIS, B. JACOB..……187

Session 3. Signalisation routière et aides à la conduite

Dispositifs de vision tout temps - Aide à la conduite
F. TAILLADE, E. BELIN, J. DUMOULIN, E. DUMONT, F. CHRISTNACHER, V. BOUCHER..…….. 199

Visibilité de la signalisation horizontale : évaluation de différents niveaux de performance avec une méthode innovante
P. ANELLI, J. BRUNET, P. DA SILVA DIAS, G. YAHIAOUI..…….. 207

Études spécifiques en conditions météorologiques dégradées pour la sécurité routière : approches expérimentales et modélisation
M. COLOMB, J. DUMOULIN, V. BOUCHER, M. MARCHETTI, F. BERNARDIN, P. MORANGE….. 217

Évaluation de l'impact de systèmes d'information en virage sur le comportement des usagers
E. VIOLETTE, P. SUBIRATS, D. DOUCET…… 227

Développement de systèmes d'information dynamique pour les conducteurs en situations de conduite dangereuses
P. SUBIRATS, E. VIOLETTE, D. DOUCET, M. ARON…….. 237

Projet de signalisation dynamique des arrêts de cars (SIDYAC)
C. VACQUIER-BIGOT, R. DIK, X. BERTRAND…….. 247

Trajectographie submétrique par couplage DGPS, carte précise des marquages et vision
D. BETAILLE, P. NICOLLE, S-S. IENG..……257

Evolution des systèmes d'aide à la conduite et de sécurité : quelques enjeux liés à leur conception et à leur validation
V. ABADIE, J-F. BOISSOU ……... 267

Résultats et projet d'expérimentation des systèmes coopératifs routiers en France
G. SEGARRA, A.K. MOKADDEM, M. LENARDI ……277

DIVAS : comment adapter dynamiquement la demande à l'offre de sécurité routière
N. HAUTIERE, P. LEPERT…….. 287

Session 4. Evaluation et acceptabilité des systèmes

Evaluation de l'acceptabilité économique des dispositifs SARI
J. DEREGNAUCOURT, L. DROUOT……. 301

Interacceptabilité dans SARI
I. CREVITS, M-P. PACAUX-LEMOINE…….. 311

Approche méthodologique pour l'étude de la complémentarité des dispositifs et démarches expérimentales dans SARI
M-P. PACAUX-LEMOINE, I. CREVITS..... 321

Acceptation du contrôle automatisé en Loire-Atlantique. Discussions croisées de professionnels et de non-professionnels
C. EYSSARTIER, F. HAMELIN..... 331

Réflexions sur l'acceptabilité juridique appliquée aux innovations du projet SARI/AJISE
G. MICHEL, P. PIERRE, H. SLIM..... 341

Prescrire et personnaliser un message délivré par PMV pour mieux influencer le comportement des conducteurs
F. TERRADE, C. GREFFEUILLE, A. SOMAT, S. BORDEL, R. QUEGUINER..... 351

Évaluation de l'efficacité des systèmes de sécurité embarqués. Résultats du projet européen TRACE
Y. PAGE, T. HERMITTE..... 357

RADARR système d'information et d'alerte en virage : évaluation de l'efficacité du système et perspective de son déploiement opérationnel
S. POINDEXTRE 369

Analyse des comportements en termes de vitesse durant le déploiement d'un système innovant d'information : la nécessité de prendre en compte l'acceptabilité du dispositif
S. BORDEL, L. DESIRE, O. GUYE, J. MAILLARD 379

Analyse spatiale des données LAVIA
S. ROMON 389

Session 5. Applications à la gestion du trafic, aux populations vulnérables et au domaine urbain

Caractérisation de l'éco-conduite et construction d'un indicateur dynamique pour véhicules thermiques
G. SAINT PIERRE, C. ANDRIEU 401

Développement d'un système de détection de quasi-accidents en carrefour
P. SUBIRATS, E. VIOLETTE, F. CONCHE, D. DOUCET, G. DUPRE 411

VIVRE2 : véhicules industriels et usagers vulnérables de la route
Z. ROISSAC, H. TATTEGRAIN, A. MAINCENT, R. LABAYRADE 421

Amélioration des connaissances sur les accidents impliquant un automobiliste et un piéton : projet CACIAUP
T. HERMITTE, V. PHAN 431

Outil vidéo pour la mesure de matrices origine/destination en giratoire
Y. GOYAT, F. MENANT, O. PITARD, T. CHATEAU..... 441

Vers un modèle proactif pour identifier des risques de trafic
M-H. PHAM, A. BHASKAR, A-G. DUMONT 451

Une étude concernant les pelotons de véhicules
D. DAUCHER..... 465

Liste des auteurs..... *471*

Avant-propos

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité

Le LCPC est un établissement public à caractère scientifique et technologique (EPST), placé sous la tutelle conjointe du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche (MESR) et du Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer (MEEDDM). Jouissant d'une reconnaissance bien établie, en France et à l'étranger dans le domaine du génie civil, le LCPC veut s'affirmer davantage dans le domaine de la ville, de l'exploitation et la sécurité des infrastructures, de l'environnement et de la prévention des risques.

Avec 610 agents, il est principalement implanté sur des sites parisiens et nantais. Il comprend 6 départements de recherche, incluant trois unités mixte de recherche dont deux avec l'INRETS, et des grands équipements.

L'INRETS, Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité, a des compétences mises au service du développement de systèmes et de services de transport plus économes en énergie, maîtrisant mieux leurs impacts sur l'environnement et la santé, plus efficaces et plus sûrs. L'institut intervient principalement dans les transports terrestres, mais couvre également les interfaces avec les modes aériens et maritimes. L'INRETS est un établissement public à caractère scientifique et technologique (EPST) placé sous la double tutelle des ministères chargés de la recherche (MESR) et des transports (MEEDDM).

Avec 460 agents permanents, il est implanté sur 5 sites (Lille-Villeneuve d'Ascq, Marne-la-Vallée, Satory-Versailles, Lyon-Bron et Marseille-Salon de Provence), et son siège est à Lyon-Bron. Il est composé de 17 unités de recherche, dont 7 unités mixtes et 2 unités de service. L'INRETS a 4 filiales (ERT, LIER, CITILOG et CIVITEC commune avec le LCPC).

L'annonce par le président de la République en 2002 de la sécurité routière comme cause nationale, relayée par la Direction de la Circulation et la Sécurité Routières (DSCR) a conduit le LCPC et l'INRETS à développer fortement leurs activités de recherche et développement dans ce domaine. Leur implication s'est traduite par le montage et le pilotage d'actions concertées financées par le PREDIT 3 (Programme de Recherche et d'Etude sur les Transports), notamment ARCOS (Action de recherche pour une conduite sécurisée, 2002-2004) et SARI (surveillance automatisée des routes pour l'information des conducteurs et des gestionnaires, 2005-2010), et une participation très active de leurs unités de recherche dans ces projets et de nombreux autres projets européens.

Les thématiques d'évaluation et de prévention des risques routiers et le développement d'aides à la conduite embarquées et sur l'infrastructure figurent parmi les axes principaux de recherche des deux organismes, et en particulier de leurs deux unités mixtes : le LIVIC (Laboratoire d'Interaction Véhicule Infrastructure Conducteur), et le LEPSIS (Laboratoire Exploitation, Perception, Simulateurs et Simulations).

A ce titre, il était légitime que le LCPC et l'INRETS unissent leurs efforts pour organiser la conférence PRAC2010 dont une large partie diffuse et valorise les résultats des projets PREDIT, dont SARI.

Hélène Jacquot-Guimbal
Directrice Générale
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Guy Bourgeois
Directeur Général
Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité

Préface

La réduction du nombre de victimes d'accidents de la route est une priorité commune aux autorités d'un grand nombre de pays. Devant l'ampleur des chiffres il n'est plus possible de continuer à envisager des solutions ponctuelles, mais au contraire d'aborder la route comme un « système ». L'infrastructure routière est empruntée par des usagers de catégories très différentes (véhicules légers, poids lourds, deux roues), seuls ou en groupes, de jour comme de nuit, sur des réseaux aux caractéristiques diverses. Le comportement au volant de ces mêmes usagers est également très hétérogène.

Les nouvelles technologies ont permis des améliorations importantes du diagnostic des zones à risques de l'infrastructure, et des aides et alertes aux conducteurs. Elles permettent de pallier les défaillances du conducteur en cas de réaction tardive, inadaptée, ou en cas de présence d'accidents et d'obstacles. Ces dispositifs visent à inciter, voire à contraindre, un comportement plus sûr des conducteurs.

PRAC2010 est une conférence scientifique visant à faire un état des progrès enregistrés ces dernières années dans le domaine de la sécurité routière. Elle s'attache notamment à faire le point sur les projets du PREDIT 3 et en particulier le projet SARI (Suivi Automatisé de l'état des Routes pour l'Information des gestionnaires et des conducteurs), et à définir des axes de développement futurs.

Les thèmes de la conférence sont :

Thème 1 - Caractérisation du risque routier, vis à vis de l'infrastructure (session 1) et vis à vis du comportement (session 2)

Ce thème couvre le diagnostic, la détection, la localisation, la caractérisation et la quantification des risques routiers, la modélisation, les mesures et observations de trajectoires, la dynamique des véhicules et le comportements des conducteurs.

Thème 2 - Signalisation routière et aides à la conduite (session 3)
Ce thème concerne les dispositifs innovants de signalisation des dangers, en bord de voie ou embarqués, d'alerte des conducteurs, et les dispositifs d'aide ou de contrôle de la conduite.

Thème 3 - Evaluation et acceptabilités des systèmes (session 4)
Ce thème s'intéresse à l'évaluation de l'impact des systèmes embarqués ou en bord de voie, et de leur acceptabilité des points de vue humain, social, environnemental, juridique, économique et technique.

Thème 4 - Applications à la gestion du trafic, aux populations vulnérables et au domaine urbain (session 5)

Ce thème regroupe l'évaluation des temps de parcours, l'information sur les incidents et accidents, la protection des populations vulnérables, piétons ou personnes âgées, la caractérisation des risques et les alertes en ville.

Bernard Jacob
Directeur technique Infrastructures et Sécurité Routières, LCPC

Marie-Line Gallenne
Adjointe au Directeur technique de la Direction technique Infrastructure et Sécurité Routière, LCPC

Le PREDIT

Le Predit est un programme de coordination des politiques françaises de recherche et d'innovation sur les transports terrestres. Il résulte d'un accord pluri-annuel entre les trois ministères chargés du développement durable (MEEDDM), de l'industrie (MinEIE) et de la recherche (MESR) et trois agences (agence nationale de la recherche – ANR, agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie – ADEME, agence de l'innovation – OSEO) pour associer leurs efforts incitatifs sur les transports terrestres (routier, ferroviaire, fluvial) . Lancé en mai 2008, le quatrième programme (Predit 4) a fait l'objet d'un protocole d'accord signé en août de la même année qui porte sur la coordination de 400 M€ de crédits incitatifs.

Un domaine au cœur des enjeux du développement durable…

Il n'est plus guère nécessaire de souligner longuement, aujourd'hui, à quel point les transports sont impliqués dans les enjeux du développement durable, c'est-à-dire concernés par la recherche d'équilibres entre enjeux environnementaux, économiques et sociaux. La place de la mobilité dans les modes de vie contemporains est très importante (recompositions familiales, fractionnement des parcours professionnels, allongement des durées de vie et de retraite…) ; elle est de plus en plus au cœur des systèmes de production et de distribution des marchandises (globalisation, éclatement des lieux de production, réduction des stocks). Mais cette place de la mobilité est pour partie liée au faible coût relatif des transports, alors que la contribution de ce secteur aux pollutions locales (polluants réglementés ou non, bruit) et globales (effet de serre) est majeure, et que les problèmes de congestion sur des infrastructures de plus en plus difficiles à financer et à réaliser sont préoccupants pour l'avenir.

...et des défis industriels d'aujourd'hui, en France notamment

Les entreprises françaises de ce secteur (industrie, opérateurs, services) ont un rang important en Europe et dans le monde. Mais elles ont à faire face à un marché et une concurrence mondialisés, à une réduction relative de leurs marchés nationaux au profit de marchés lointains à normes sensiblement différentes. Dans ce contexte, la recherche et l'innovation sont aujourd'hui des paramètres majeurs de la compétitivité, donc de l'emploi, et les équipementiers, entreprises importantes ou PME, y prennent une part de plus en plus significative.

Il en résulte que les enjeux de politiques publiques et les enjeux industriels de ce secteur d'activité sont fortement imbriqués (véhicules propres, sécurité routière, réseaux de transports collectifs, organisation de l'intermodalité...), ce qui justifie l'intérêt et même la nécessité d'une coordination interministérielle des soutiens à la recherche et à l'innovation.

Pour la diversité et la cohérence des initiatives en France...

Une plate-forme nécessaire pour les transports terrestres

Le domaine des transports tel que nous le connaissons aujourd'hui appelle à la fois des recherches technologiques et scientifiques de haut niveau (processus de combustion, stockage de l'énergie, impact des particules sur la santé), des expérimentations en vraie grandeur (véhicule électrique) et des soutiens à l'innovation locale (logistique urbaine, information multimodale). La plate-forme interministérielle que constitue le Predit permet la mise en oeuvre et la coordination de cette diversité des recherches et des modalités de sélection (appels d'offres, gré à gré, montage de consortiums ad-hoc).

Depuis 2005, le paysage du soutien à la recherche sur projets a beaucoup changé en France, dans le but de dynamiser la recherche et l'innovation : création de l'ANR, mise en place des pôles de compétitivité et d'un fonds interministériel pour soutenir leurs projets, restructuration des soutiens aux PME par la création d'OSEO, création de l'Agence de l'innovation industrielle (aujourd'hui intégrée à OSEO), implication croissante des collectivités territoriales. Le Predit permet, dans son domaine des transports terrestres, la mise en cohérence des orientations et des actions de l'ensemble des dispositifs, les plus récents déjà cités comme ceux qui existaient auparavant : actions de recherche impulsées par le ministère en charge des transports (aujourd'hui MEEDDM), par l'ADEME ou par l'ANVAR (OSEO). Cette fonction reste nécessaire et doit être renforcée sur le plan des démarches stratégiques concertées (feuilles de routes technologiques par exemple). Aux frontières de l'action

incitative, la coordination doit permettre des initiatives pour constituer ou renforcer les milieux de recherche déficients au regard des enjeux.

Le troisième apport de ce dispositif, et non des moindres, est d'inclure dans les modalités de travail le suivi, la capitalisation et la diffusion des résultats, et, à travers l'ensemble de cette chaîne, l'animation de milieux de recherche et d'innovation.

...et la complémentarité avec les programmes européens

Comparés à d'autres domaines ou d'autres pays, les résultats français dans le 6ème PCRD dans le domaine des transports n'ont pas été tout à fait satisfaisants et devront être améliorés dans le programme 2007-2013.

Un programme national peut aider à préparer des équipes et des sujets (fonction « tremplin »), mais il est également nécessaire comme complémentarité aux programmes européens pour permettre des partenariats plus réduits, pour des recherches nécessitant plus de confidentialité, pour des sujets très liés aux institutions nationales (limiteur de vitesse) et impliquant des expérimentations, ou enfin pour répondre à des enjeux industriels nationaux (maintien d'un potentiel R&D sur les véhicules lourds).

Six priorités thématiques

Le programme 2008-2012 est organisé autour de six priorités thématiques. Dans chacune d'elle seront traités à la fois les recherches à finalités technologiques et de services et les recherches destinées à l'éclairage des politiques publiques :

- Energie et environnement
- Qualité et sécurité des systèmes de transport
- Mobilité dans les régions urbaines
- Logistique et transport de marchandises
- Compétitivité de l'industrie des transports
- Politiques de transport

Pour chacune de ces priorités, un groupe d'expert (« groupe opérationnel ») conseille et assiste les financeurs des recherches sur les priorités, l'évaluation des projets, l'organisation des suivis, de la capitalisation et de la diffusion des résultats.

La sécurité routière dans le PREDIT 4

La sécurité routière a été une des grandes priorités du Predit 3 (2002-2007), en accord avec le grand chantier présidentiel de cette période. Une activité de recherche importante a été déployée dans le domaine des assistances à la conduite (projets Arcos, Sari, Lavia…), dans celui des relations entre santé et sécurité (médicaments, somnolence au volant…), dans celui de la formation tout au long de la vie (programme Continuum éducatif) et pour développer des connaissances sur l'économie de la sécurité routière. Beaucoup des projets engagés dans le Predit 3étaient encore en cours au lancement du Predit 4 : d'où l'importance d'assurer la continuité des suivis et de la diffusion des résultats, ce que fait le colloque de cette semaine pour le projet Sari.

Dans le Predit 4, la sécurité routière est intégrée dans la priorité plus large « Qualité et sécurité des systèmes de transport ». Ce choix vise à permettre à la fois de prolonger les efforts du Predit 3 et de susciter des recherches agrégeant les objectifs de sécurité, d'accessibilité, d'ergonomie, de confort tous éléments attendus dans la qualité, qu'elle soit considérée du point de vue de l'usager ou de celui des gestionnaires ou des porteurs des politiques publiques.

Jean-Louis Léonard
Député de Charente-Maritime
Président du PREDIT

TABLES RONDES

Table ronde n°1

Quelles recherches au service de l'évaluation des risques routiers pour tous les réseaux ? Peut-on construire une vision des outils à développer pour répondre aux besoins ?

Participants : René Amalberti (MACSF, PREDIT4/GO2), Xavier Cocu (CRR, BE), Hélène Fontaine (INRETS), Pascal Lechanteur (MEEDDM/DGITM/DIT), représentant conseils généraux

Animateur : *Bernard Jacob (LCPC)*

La perception par des capteurs embarqués permet d'anticiper sur les conflits potentiels à courte distance en assurant le recueil d'information pour le développement des systèmes d'aide au conducteur. Les projets du PREDIT 3 ont permis des avancées notables au niveau mondial pour la localisation latérale du véhicule sur la route et la détection d'obstacles, grâce en particulier au traitement numérique d'images vidéo, à la caractérisation embarquée de la visibilité par temps de brouillard et à la détection stéréovision.

Le diagnostic routier est nécessaire pour identifier et localiser les zones risquées pour les usagers en termes de pertes de contrôle et de visibilité. Des progrès sensibles ont été obtenus dans les projets du PREDIT 3 sur les pertes de contrôle en virage, en carrefour et en haut de côte. Trois nouveaux outils mesurent les défauts de visibilité géométriques et les performances des revêtements et des marquages pour une meilleure vision des obstacles. De nouveaux outils de mesure de trajectoires en bord de route permettent d'analyser et de quantifier la proportion de véhicules qui prennent des risques.

Comment mieux apprécier les risques de dysfonctionnement dans les interactions véhicules/ infrastructures/conducteurs, et notamment de façon plus préventive que par la seule accidentologie ?

Comment développer un diagnostic plus fonctionnel, plus large, moins coûteux, et mieux quantifié, donc utilisant plus de mesures que de dires d'experts ? En particulier quel rôle affecter aux véhicules courants et à des véhicules traceurs ?

Quels sont les critères et outils, actuels et futurs, pour localiser les zones à risques ? Quelles interventions faut-il prévoir pour réduire les risques dans ces zones ?

Quelles sont les méthodes d'audits et d'inspection en Belgique, France et Suisse, et leurs avantages respectifs ?

Comment obtenir un meilleur usage de l'infrastructure du point de vue de la sécurité : vitesses optimales selon les conditions de trafic et d'environnement, modulation des interdistances, utilisation des diverses voies, etc. ?

Comment faire partager une vision commune du risque routier et de son évaluation par tous les acteurs du système ?

Table ronde n°2

Quelle répartition et quelle complémentarité entre la signalisation routière et les alertes embarquées : peut-on construire une vision commune pour les recherches à venir ?

Participants : Jean-Marc Blosseville (INRETS), Christophe Desnouailles (SETRA), Alain Servel (PSA), Claude Laurgeau (ENSMP), B. Lucas (MEEDDM/DGITM), X… (MEEDDM/DSCR)

Animateur : *Marie-Line Gallenne (LCPC)*

De nombreux projets du PREDIT 3 proposent de nouvelles informations aux conducteurs, soit en bord de voie, soit dans les véhicules. Dans les deux cas, cette information peut être fournie sous la forme de nouveaux signaux ou de pictogrammes de signalisation routière. Cette solution s'appuie sur une connaissance acquise des signes et des messages. Des alertes avertissent le conducteur uniquement quand le risque existe ou que le conducteur roule trop vite. Il reste néanmoins à régler le problème de surabondance des informations et des incohérences notamment entre le bord de voie et l'embarqué.

Un des moyens de limiter le nombre des informations est de générer une alerte au conducteur seulement lorsqu'il n'a pas pris en compte le danger de la situation. Plusieurs fonctions de risque ont été développées dans ce but dans différents projets : le dépassement de la vitesse règlementaire, celui d'une vitesse de passage de virage en sécurité, les risques de sortie de voie, de collisions en file et de collision avec un obstacle.

Les travaux de SARI proposent de nouvelles alertes au conducteur en bord de voie : comment va évoluer la réglementation pour mieux intégrer ces nouvelles alertes ?

Quelle est la situation européenne en termes d'alertes en bord de voie ?

Quel est leur déploiement possible en France ?

Quelles alertes embarquées sont proposées aujourd'hui par les constructeurs et quelles sont les évolutions prévues ?

Quelle complémentarité et différence par rapport aux alertes embarquées

Peut-on construire une vision française qui soit davantage basée sur la complémentarité ?

Table ronde n°3

Peut-on définir le contenu des différentes acceptabilités (évaluations) d'un système d'aide aux conducteurs qui fasse consensus ?

Participants : Alain Somat (LAUREPS), L. Baumstark (Université Lyon 2), Fleur Breuillin (MEEDDM/DRI), Marie-Pierre Fléchon (CG38), Michèle Guilbot (INRETS), Dominique Mignot (INRETS), X… (SETRA)

Animateur : *Marie-Line Gallenne (LCPC)*

Dans la plupart des projets du PREDIT 3, deux sujets ont été traités : l'estimation de l'impact des fonctions développées sur les gains potentiels en sécurité routière, et l'acceptabilité par les conducteurs des systèmes proposés. Si les gains potentiels généralement calculés peuvent être importants (entre 10 et 30%), il reste difficile d'évaluer quel sera l'impact réel et des progrès restent à faire sur le partage de méthodes. Seuls quelques projets ont vérifié sur route, quels étaient les gains réels en vitesses pratiquées. En termes d'acceptabilité, les conducteurs apprécient généralement des informations supplémentaires. Ils sont par contre plus réticents vis-à-vis des systèmes contraignants.

Beaucoup de projets en sécurité routière ont évalué les bénéfices à tirer des innovations développées et parfois les contraintes associées au déploiement. Que tirer de ses expériences : une hétérogénéité intéressante ou gênante ?

Quels sont les besoins pour les décideurs pour lancer le déploiement ou mettre en œuvre les solutions proposées ?

Les méthodes sont elles fiables quant à l'acceptabilité et l'appropriation par les usagers ?

Quelles sont les contraintes réelles en termes juridiques ?

Les méthodes et les résultats sont –il suffisants pour que pouvoirs publics puissent décider de soutenir des actions ?

Faut-il développer une méthodologie d'évaluation qui fasse consensus et qui soit reconnue au niveau national voire international ?

Table ronde n°4

Nouveaux défis de mobilité et sécurité : trafic, usagers vulnérables et ville. Quels sont les enseignements à tirer des recherches récentes et du PREDIT 3 ?

Participants : Patrick Coroller (ADEME), X… (MEEDDM/DSCR), Marie-Madeleine Le Marc (CERTU), Jean-Baptiste Lesort (INRETS), André Peny (RATP), Laurent Trassoudaine (LASMEA)

Animateur : *Bernard Jacob (LCPC)*

Les priorités du PREDIT 4 se situent principalement autour de 3 thèmes :

- l'évolution des mobilités et ses conséquences sur les congestions
- le foisonnement croissant de l'offre de transport et des ruptures de mode
- les nouveaux enjeux de la sécurité routière

L'augmentation forte des congestions des transports en commun et de la circulation des deux-roues, motorisés ou non – notamment en environnement urbain – entraînent un accroissement du mécontentement et du risque ; la société est parallèlement devenue plus intolérante à toute perturbation ;

L'offre de transports soit en interurbain ou en milieu urbain, le décloisonnement des modes et la variabilité des choix des voyageurs en fonction de facteurs aussi variés que le confort, le temps, le coût, etc. rendent complexe la gestion de la multimodalité et de l'intermodalité pour les opérateurs comme pour les voyageurs. Les chaînes intermodales imaginées aujourd'hui exigent de nombreuses transitions (marche à pied, vélo) qui sont trop souvent traitées comme des parents pauvres. Un enjeu fort réside donc dans la gestion de ces transitions et des incompréhensions associées à la complexité.

Les nouveaux enjeux de la sécurité routière induits par les politiques publiques de lutte contre la mortalité routière fixent un cadre d'orientation fort aux travaux du Predit. Le gouvernement a fixé de nouvelles priorités avec un objectif de moins 3 000 morts par an à l'horizon 2012, des objectifs forts sur l'alcoolémie, la mortalité en deux-roues et celle des jeunes. Les usagers vulnérables devront particulièrement être pris en compte – notamment les deux-roues motorisés et les vélos – et la signature d'une charte avec les acteurs du transport routier de marchandises. De plus, à l'instar de la politique menée par la Commission européenne, cet objectif s'accompagne d'une nécessaire réduction du nombre de blessés.

Economie d'énergie, transports publics et usagers vulnérables se développent de façon corrélée. Quels sont les besoins et risques spécifiques et leur évolution ?

Quels sont les problèmes spécifiques aux piétons (dont enfants et personnes âgées), cyclistes et deux roues motorisés ? Quels aménagements de l'infrastructure et assistances individuelles sont requis ?

Quel partage de l'espace entre usagers vulnérables et autres, notamment en ville ?

Quelles solutions technologiques ou organisationnelles peuvent contribuer à une meilleure mobilité durable et sécurité des usagers vulnérables ?

SESSIONS PLENIERES

Co-animateurs : M-L.Gallenne et B. Jacob (LCPC)

POUR UNE VISION SYSTEMIQUE DU RISQUE ROUTIER ET DE LA RECHERCHE ATTENANTE (THEME 1)

Docteur en psychologie cognitive de l'université de Paris 8, professeur de physiologie et d'ergonomie à l'hôpital militaire du Val-de-Grâce et chef du département des sciences cognitives à l'IMASSA. Mène des recherches sur la conception de systèmes supports intelligents, la gestion et la prévention des erreurs humaines, et le contrôle du risque individuel, des groupes et des systèmes. Président du GO2 du PREDIT.

René AMALBERTI
Président du GO2 du PPREDIT

La sécurité et la qualité ont ceci de particulier qu'elles ne connaissent jamais de maximum. On peut toujours faire mieux, et il est même légitime de toujours s'améliorer.

1. Les PREDITS successifs ont accompagné cette évolution

Entre 1970 et 1990, la sécurité a profité pleinement du mariage entre recherche appliquée et obligations réglementaires (châssis intelligents, structures déformables, ceintures, airbags, aménagements de glissières sur les routes, etc.) et a « gagné » près de 8000 décès en deux décennies.

Les 10 ans qui ont suivi, à l'époque des PREDIT I et II, ont été moins marqués par des progrès spectaculaires (1500 morts de moins). La recherche était active, fourmillante d'idées et d'orientations possibles, mais les stratégies de déploiement se cherchaient entre une solution du tout technologique embarqué à bord des véhicules, nourrie par une intelligente informatique croissante, mais toujours plus coûteuse (lancement du projet ARCOS, premiers prototypes de surveillance automatisée de la vigilance du conducteur), une hypothétique route automatisée, et des actions plus immédiates sur les gisements de sécurité les plus évidents, notamment par des mesures d'ordre réglementaires (contrôle d'alcool, vitesse limitée, permis à points). A noter dans cette même période la mise en place stratégique des premiers registres de blessés (Rhône) et d'une compréhension poussée des accidents (EDA) qui allait servir pleinement dans le PREDIT suivant

Le PREDIT III a été marqué par la formidable avancée des progrès de sécurité routière, largement liée au déploiement des radars et du contrôle sanction automatisée (près de 4000 morts de moins en 4 ans).
La volonté d'agir sur le comportement des conducteurs a fédéré l'action de terrain et d'une certaine façon fédéré une grande partie de la recherche de ce PREDIT III. Les constructeurs avaient intégré ce qui paraissait commercialement vendable du tout technologique et étaient presque au bout du concept. Les questions de recherche changeaient.
Cinq axes avaient été choisis pour progresser dans les gisements résiduels de sécurité peu sensibles aux effets du contrôle sanction:

- se concentrer sur les usagers vulnérables, deux roues, piétons, en leur offrant des éléments de sécurité innovante pour mieux partager la route,
- fédérer une action de grande amplitude sur les facteurs physiologiques et psychologiques de prise de risque au volant, sans hésiter à mobiliser sur ce thème la santé qui ne faisait pas partie des objectifs des PREDIT précédents,

- s'intéresser aux politiques publiques et à la conduite du changement à la fois dans l'éducation des conducteurs et dans la pratique du contrôle sanction,
- envisager un complément aux technologies de sécurité embarquées, plus centré sur le traitement de la route et de l'environnement routier pour installer un dialogue de sécurité avec les usagers du réseau,
- sans oublier le transport guidé, sa sécurité pour les voyageurs (surveillance) et les questions récurrentes de réseau compatible européen.

C'est dans ce PREDIT III que l'initiative de l'action fédérée SARI a été prise. Il s'agissait clairement d'accélérer l'approche sur une route communicante, une route capable de s'auto-diagnostiquer sur son état de sécurité, sur ses pièges climatiques ou physiques, permanents ou temporaires, et de communiquer intelligemment aux conducteurs cette connaissance locale du réseau pour pacifier et sécuriser la conduite.

Les enjeux de recherches associés à ce projet sont tout de suite apparus considérables : théoriques, méthodologiques, techniques, et interdisciplinaires, avec des lieux réels d'expérimentations des solutions, sans oublier l'importance de l'objectif de déploiement de masse à l'issue.

2. Le PREDIT IV voit se terminer ce projet coordonné, tout en prenant en compte un certain nombre de nouveaux objectifs

Nous voici au PREDIT IV. Le ralentissement de la courbe de gain et les nouveaux enjeux sociétaux (crise mondiale, Grenelle de l'environnement) sont une fantastique opportunité pour la recherche en transport. Ce contexte repose de façon différente et en même temps sert les questions de Sécurité et de Qualité dans les transports.

La demande est plus grande et plus complexe car les dimensions à traiter sont souvent antagonistes l'une de l'autre, et la recherche doit de ce fait prioriser les compromis et se décloisonner dans ses modes d'approches des systèmes

En effet, non seulement les problèmes du PREDIT III demeurent, mais ils sont mêmes plus nombreux et exigent un traitement de recherche différent.

Le maître mot de ce PREDIT IV est « l'usage sûr et réaliste » des transports.

Dans le cadre de SARI, 'l'usage' renvoie à la Qualité du réseau routier à connaître et communiquer son état d'une façon ergonomique et pratique aux usagers et aux exploitants. Les problèmes peuvent se décliner autant dans le maintien des capacités de conduite que dans la mobilité et la fluidité du trafic. Pour traiter ces questions, 'le diable est souvent dans les détails' : on est déjà arrivé à atteindre plusieurs objectifs de SARI sur les autoroutes, mais la plupart des enjeux de qualité et de sécurité sont maintenant sur le réseau secondaire, 20 à 50 fois plus grand selon l'inclusion du niveau de route que l'on accepte, 20 fois plus vulnérable, et immensément plus difficile et coûteux en matière de déploiement et maintenance des systèmes d 'information'. Peu de solutions fonctionnelles sur les autoroutes trouveront une extension sur les départementales ; il faut la plupart du temps repenser la copie. L'arrivée des TIC permettra sans doute de contourner l'imposition de certains équipements fixes de signalisation dont le coût serait rédhibitoire, mais il faut arriver à penser la recherche en silo de spécialités, et en même temps penser dès le départ à l'assemblage et la cohérence interdisciplinaires de ces silos. La tâche d'assemblage et de coordination finale entre les approches techniques sur la connaissance du

réseau, les approches sur la communication, les articulations avec la construction et l'équipement des véhicules, les actions réglementaires nécessaires à l'accompagnement, et l'acceptabilité juridique, pourrait même constituer le verrou le plus difficile à franchir pour la recherche sur ce secteur. Une véritable recherche systémique utilisant les connaissances sur l'assemblage cohérent de systèmes de systèmes reste à développer.

Le terme « sûr » renvoie à la fois à sûreté et à sécurité. Sûreté pour la vulnérabilité du réseau au terrorisme et au vandalisme, une préoccupation qui a fortement grandie, même pour els équipements de surveillance et d'information de la route. Sécurité pour le classique volet de sécurité routière. Là encore l'usage est central : partage de la route et comportements adaptés. La lutte contre les comportements inadaptés ou dangereux doit à la fois capitaliser les recherches et résultats passés, et s'adapter aux contraintes actuelles : le contrôle sanction commence à montrer ses limites. Les actions en profondeur et sur un horizon temporel plus long, mieux adaptées à la recherche, ont donc une place à nouveau essentielle dans l'agenda de recherche : repenser le système de formation (formation initiale, introduction des simulations? etc.), repenser profondément l'approche de l'aide à la conduite en intégrant la connaissance très anticipée sur les pièges du réseau et un guidage intelligent, et repenser tout aussi profondément l'approche des comportements, et notamment de la prise en compte des effets parfois négatifs de surprises ou des distractions que peuvent représenter des centaines d'informations remontant vers le conducteur, certaines urgentes et centrées sur la route, d'autres parasites et peu utiles, sans parler des informations privées empruntant les mêmes canaux (téléphone, etc.).

Le terme « réaliste » couvre la prise en compte d'une réalité marquée par la crise et le Grenelle de l'environnement : la recherche doit intégrer ces dimensions, et penser à un usage devenu plus rationnel des transports (étude des trajets imposés, bilan carbone, contrôle de l'urbanisation, fluidification du trafic, adaptation des transports publics) avec des solutions pensées pour être suffisamment efficaces et abordables financièrement lors de leur déploiement national, notamment dans le domaine de l'équipement du réseau qui est maintenant à la charge des départements et des régions (ce qui ne veut pas dire une recherche bradée ou à bon marché …mais qui signifie une solution économique comme produit d'une recherche efficace).

On l'aura compris, le PREDIT IV signent la fin d'une façon traditionnelle, mono disciplinaire et cloisonnée d'effectuer les recherches dans tous ces domaines de la Qualité et de la Sécurité.
Aucun résultat significatif ne sera obtenu par une vision en silo ou purement réglementaire: probablement trop locale, trop cher, trop irréaliste, et finalement trop simple.

Les questions à traiter sont toutes imbriquées, et d'une immense complexité imposant des consortiums multidisciplinaires. Quand le RER dysfonctionne, les usagers prennent la voiture et augmentent le bilan carbone, prennent les deux roues et sont infiniment plus vulnérables, d'autres restent à la maison trop fragiles pour ces journées difficiles et sont oubliés de la société… La même logique s'applique à toutes les composantes de ce puzzle complexe et partagé que l'on appelle les transports. Qu'une composant vienne à défaillir et toutes les autres s'aggravent. Les solutions doivent donc traiter l'interaction entre ces composantes dans sa globalité tout autant que l'action optimisée sur l'une ou sur l'autre. De même la l'évaluation, l'acceptabilité et la maintenance du réseau deviennent des points critiques impliquant une recherche qui doit se décliner avec des objectifs synchrones avec l'économie des systèmes : refondation complète à imaginer à 30 ans, replâtrage local à 5 ans, maintenance optimisée sur la vie du système; toutes ces échéances ont la même pertinence, le même objectif de servir l'usage, mais des moyens et des stratégies de recherches différentes que les laboratoires doivent acquérir.

INFORMATION AU CONDUCTEUR : BORD DE ROUTE OU EMBARQUE ? (THEME 2)

Ingénieur diplômé en 1980, DEA d'électronique et DEA d'informatique (Paris 6). A passé une grande partie de sa carrière dans le développement de systèmes électroniques pour l'automobile (Renault) et le ferroviaire (Alstom Transports). Actuellement Directeur de Projets Avancés dans les domaines Sécurité et Performance Dynamique.

Christian BALLE
Direction de la Recherche, des Etudes Avancées et des Matériaux
Renault, Guyancourt, France

Depuis les années 90 l'insécurité routière régresse. Quelque soit le périmètre européen (EU15 – EU27) ; les statistiques EU27 diminuent régulièrement passant de 75 000 morts en 1991 à 42 650 en 2007. Cependant nous pouvons noter une inflexion commencée en 2005 et qui montre un écart croissant entre les objectifs et la réalité. Si nous regardons plus particulièrement en France, ces 2 dernières années voient plutôt une stabilisation globale des statistiques, par contre les décès d'usagers vulnérables tendent à augmenter. Si nous examinons les résultats dans le monde, nous pouvons constater que la répartition est très différente d'une zone géographique à l'autre. Ceci est bien sûr lié aux spécificités des marchés locaux et donc des pratiques de déplacements routiers. Ainsi au Brésil les piétons représentent la principale population victime et en Inde ce sont les 2 (3) roues motorisés.

statistiques accidentologiques	passagers VP	2-3 roues motorisés	cyclistes	piétons	autres véhicules
France	52%	26%	3%	13%	6%
Inde	15%	27%	4%	13%	40% (forte incertitude statistique)
Brésil	21%	20%	5%	27%	27%

Si nous regardons maintenant les facteurs de risques, il s'avère que l'inadéquation de la vitesse est de loin le principal, suivi du manque de visibilité (temporaire) puis des perturbations de l'environnement routier.

Toutes ces considérations nous incitent à rechercher les moyens d'aider le conducteur à adapter sa vitesse à son environnement routier. La notion de « vitesse adéquate » ne relève pas que du respect de la limitation locale (matérialisée par les panneaux de limitation de vitesse et conforme au code de la route). En effet il existe de nombreux facteurs déterminants la vitesse de circulation. Citons des facteurs circonstanciels tels que densité de la circulation, évènements particuliers, restrictions locales… Le conducteur doit alors adapter sa vitesse à ces circonstances. Mais pour ce faire il doit posséder les informations pertinentes. C'est ainsi que nous avons vu apparaître sur nos routes de nouvelles signalisations de différents types :

- PMV (panneau à message variable) : gestion spatio-temporelle d'informations,
- les radars locaux préventifs : utilisés par les communes pour protéger une zone spécifique.

Figure 1 – PMV pour une gestion spatio-temporelle d'informations

Figure 2 – Système embarqué d'information

Par extension les systèmes embarqués permettent de nouvelles informations apparentables à de la signalisation (aussi bien par la forme que par le fond). Mentionnons ainsi l'info-trafic (par navigation informée).

A l'avenir, avec le développement des systèmes d'aide à la conduite, nous pourrons mettre en oeuvre de nouvelles interactions. La communication Car-to-Car y contribuera fortement.

Dans un premier temps (actuellement) il convient de faire apparaitre « lisiblement » sur l'écran de navigation les informations de circulation. Il pourra ensuite s'agir de dupliquer (affichage tête haute), de l'appuyer par d'autres formes d'information (sonore). Mais dans les temps à venir il y aura possibilité d'interagir avec les systèmes embarqués et donc pas seulement directement avec le conducteur. La question se pose alors du type d'interaction « efficace », notamment du mode de diffusion – bord de route et/ou à bord des véhicules :

- l'interaction permet de traiter le problème,
- l'interaction ne surprend pas le conducteur,
- l'interaction responsabilise : ce dernier point est certainement le principal enjeu.

EVALUATION DU RISQUE ROUTIER ET VALEUR DE LA VIE HUMAINE ? (THEME 3)

Son domaine de recherche et d'enseignement est l'économie publique, la régulation économique et les questions environnementales et de santé. Il vient de rejoindre l'axe économie de la santé du GATE, avec son partenariat avec le centre régional de lutte contre le cancer Léon Bérard. Il est conseiller scientifique au Centre d'Analyse Stratégique, membre de la CEESP (Commission de l'évaluation économique et de Santé Publique) de la Haute Autorité de Santé, et membre du Conseil Economique pour le développement durable du ministère de l'écologie. Il vient enfin d'être élu doyen de la faculté de science économiques et de gestion de l'université lumière Lyon2

Luc BAUMSTARK
Maître de conférences en sciences économiques Université Lumière Lyon2, Lyon

Dans une approche économique, le terme de valeur de la vie humaine fait référence au prix que les individus sont prêts à payer pour obtenir une réduction de leur probabilité de décès. De manière similaire, le décideur public est amené à opérer de tels choix, la question étant alors de savoir quel est l'effort que la collectivité est prête à consentir pour réduire les probabilités de décès. Pour appréhender cette valeur collective, a été définie la notion de valeur statistique de la vie humaine, utilisée avant que le choix ne soit effectué et sans connaissance de l'identité du bénéficiaire. Dans une approche économique, le terme de valeur de la vie humaine fait référence au prix que les individus sont prêts à payer pour obtenir une réduction de leur probabilité de décès. Les décisions prises quotidiennement reflètent ainsi le prix attaché implicitement à la vie. Si l'on considère le domaine de la sécurité routière, répondre au téléphone en conduisant, ne pas attacher son enfant à l'arrière d'un véhicule, doubler dans des conditions difficiles un poids lourds qui impose une vitesse plus réduite sur le réseau, renoncer à un airbag en raison du prix demandé par l'industriel, prendre ou ne pas prendre une option en matière d'assurance, sont autant de décisions qui reflètent un prix implicite de la sécurité et donc une valeur attachée à la vie. Il en va de même en matière de santé, où des comportements de consommation de substances toxiques, ou de certains types d'aliments, augmentent de manière significative la probabilité de survenue de certaines maladies, voire de décès.

De cette comparaison naissent un certain nombre d'interrogations et de pistes d'échanges entre ces deux secteurs d'application du calcul économique qui sont une invitation à une réflexion plus approfondie.

L'objet de cette intervention est de revenir rapidement sur les méthodes qui permettent d'estimer cette valeur, de montrer en quoi elle participe de l'éthique des choix publics. Dans ce cadre il est important de situer la valeur statistique de la vie humaine au regard du risque.
Les considérations de prise en compte du risque posent la question de la perception du risque par les individus et les comportements et la manière dont ces éléments sont perçus par la collectivité. La production d'un référentiel pour l'évaluation a suscité de nombreuses interrogations, notamment sur la place respective de la responsabilité individuelle et de la responsabilité collective. La valeur de la vie statistique humaine renvoie en effet nécessairement à la question du partage du risque entre les individus et la collectivité. Quelle part la collectivité doit-elle assumer, compte tenu de la myopie des agents et quelle est celle qui devrait rester à la charge de l'individu ?

De manière générale, la valorisation des bienfaits attendus d'une diminution du risque de décès prématuré peut être appréciée de manière très différente selon qu'on considère que le risque est volontaire ou pas, s'il est contrôlable ou pas, selon que l'on traite de risques familiers ou au contraire extraordinaires, si le risque concerne une personne ou un groupe de personnes, selon la perception d'injustice associée à telle ou telle situation, si c'est un risque immédiat ou au contraire un risque futur, selon l'âge des populations principalement concernées, le degré de prématurité du décès, l'état initial de santé de la personne, l'information sur le risque et sa crédibilité… sans chercher à dresser une liste exhaustive de ces caractéristiques, ces quelques éléments montrent combien l'analyse fine du risque et des responsabilités engagées peut influencer le niveau même de la valeur de référence. Le processus même de recherche d'un référentiel et d'explicitation des situations dans lesquelles des pondérations pourraient s'appliquer reste cependant incontournable pour assurer la cohérence, dans le temps et dans l'espace, de l'intervention publique en matière de sécurité. Il importe en effet d'optimiser l'action publique pour sauver des vies humaines, tout en reconnaissant l'existence de situations très diverses qui pourraient légitimer des pondérations différentes.

Ainsi, parmi les voies futures d'amélioration de l'estimation des valeurs tutélaires dans le secteur des transports, et pour pouvoir comparer les enjeux entre les différentes politiques publiques entre secteurs,

Il apparaît important de disposer d'une valeur de l'année de vie humaine et non de la vie humaine, pour tenir compte de la durée de vie gagnée. Une deuxième voie d'amélioration est la prise en compte des conséquences associées à l'existence de très nombreux blessés graves. La valeur actuelle, en se focalisant sur le seul décès, conduit à une sous-estimation. On observe en effet que les jugent accordent, dans les contentieux, des indemnités très contrastées certes d'un tribunal à l'autre, mais toujours beaucoup plus importantes en cas de survie qu'en cas de décès et dans des ordres de grandeur très supérieurs aux valeurs tutélaires actuelles. Il semble donc que ces valeurs ne soient pas en phase avec la réalité sociale du problème. Dans le secteur de la santé, les travaux menés depuis les années 70 offrent des méthodes d'appréciation très élaborées de la valeur d'une année de vie supplémentaire en bonne santé, dénommée QALY (Quality Adjusted Life Year). Ces travaux ne connaissent encore qu'un usage limité dans d'autres secteurs d'application que la santé, alors même qu'ils pourraient être utilement mobilisés dans les politiques de sécurité routière particulièrement pour appréhender la question des blessés et notamment des blessés graves dans les accidents alors qu'on se limite encore beaucoup trop à la seule évaluation du risque de décès. Raisonner sur l'année de vie, en intégrant la qualité de ces années de vie devrait permettre de dépasser cette sous-estimation.

Il apparaît également nécessaire de prendre en compte la question du risque : Les décisions en matière de sécurité routière, comme celles en santé, qu'elles émanent des professionnels, des usagers, des patients ou des décideurs publics, sont toutes prises en information incomplète, souvent asymétrique, et avec une forte composante de risque et d'incertitude. Cette caractéristique classique en économie, c'est le fait de toute décision économique, est beaucoup plus prononcée dans les domaines de santé et de sécurité en transport en raison des questions de vie et de mort qu'impliquent souvent ces décisions. Ce cadre de réflexion permet d'enrichir considérablement l'outil d'évaluation et donc sa capacité à éclairer la décision publique.

LES USAGERS VULNERABLES EN SITUATION DE MOBILITE URBAINE (THEME 4)

Docteur en neurosciences, chargé de recherche en psycho-ergonomie et sciences cognitives à l'INRETS depuis 1995 ; responsable d'un groupe de recherche travaillant sur l'accessibilité des transports aux personnes en situation de handicap au Laboratoire Ergonomie et Sciences Cognitives pour les Transports ; coordinateur de la PFI situation de handicap et transport de l'INRETS

Directeur de Recherche à l'INRETS, chargé de mission, co-pilote du DAS (Domaine d'Action Stratégique) "Solutions de Mobilités" du pôle MOVEO, membre du steering committee du réseau d'excellence européen (NoE) NEARCTIS portant sur les systèmes coopératifs, membre du groupe 2 du PREDIT (Qualité des Systèmes de Transport).

Claude MARIN-LAMELLET
INRETS/LESCOT
Lyon-Bron, France

Samuel SELLAM
Direction Déléguée, INRETS
Versailles Satory, France

Résumé

La mobilité urbaine nous semble présenter deux dimensions importantes à prendre en considération dans le contexte de cette journée : d'une part, la diversification des modes de déplacement utilisés et leur interopérabilité et d'autre part, la présence plus nombreuse d'usagers vulnérables.

Sur le plan de la diversité des modes de déplacement, l'évolution la plus marquante au niveau français est le retour du deux roues. Le développement du vélo, que cela soit en mode propriétaire ou partagé est exponentiel, tout comme celui des deux roues motorisés. Par ailleurs, d'autres modes de déplacement « doux » se sont développés comme le roller et autre engin roulant. Sur le plan des transports publics, l'évolution marquante concerne le retour en force des tramways et la réalisation de sites propres ou de couloirs de bus réservés, notamment pour les bus guidés.

Cette évolution des pratiques de mobilité pose la question de leur occupation de l'espace urbain qui n'est pas extensible et donc de la cohabitation entre tous ces modes. Cette cohabitation entraine des risques nouveaux qui doivent être analysés et pour lesquels de nouvelles solutions doivent être développées pour les réduire. Par ailleurs, la question de l'articulation entre ces modes de déplacement dans une perspective d'optimisation du déplacement est également importante à considérer.

La population des usagers dit vulnérables est très large et dans le cadre de cette communication, nous traiterons notamment cette notion sous l'angle du « mode vulnérable » (par exemple les deux roues motorisés ou non, les piétons et autres modes doux) mais aussi sous l'angle du « handicap » pris là aussi au sens large pour recouvrir notamment les personnes âgées, les personnes présentant une déficience visuelle et les personnes utilisatrices de fauteuil roulant.

La prise en compte des caractéristiques de cette population dans l'étude des modes classiques (automobile, deux roues…) ou des nouvelles formes de mobilité doit porter sur les risques encourus mais également sur les facteurs qui conditionnent les pratiques d'intermodalité. En effet, il s'agit de populations qui ne disposent pas d'un éventail de modes possibles identiques aux personnes qui bénéficient de toutes leurs capacités fonctionnelles.

Les nouvelles pratiques de mobilité s'appuient de plus en plus sur des systèmes nomades d'information plus ou moins complexes et plus ou moins adaptés aux modes choisis. On s'attardera donc également sur les risques nouveaux que peuvent créer l'usage de ces modes de communications ou d'assistance auprès des différentes catégories de populations concernées.

Mots-clés: Mobilité urbaine, Modes de Transport, Usagers Vulnérables, Handicap.

Abstract

Urban mobility seems to have two important dimensions to consider in the context of this conference: first, the diversification of transport modes used and their interoperability and on the other hand, the larger presence of vulnerable road users.

In terms of the diversity of modes of travel, the most significant change in France is the comeback of bicycles. The development of cycling, whether on owned or shared mode is exponential. As well as for two-wheeled motorized. In addition, other "soft" modes of travel evolved as the roller wheel and other gear. In terms of public transport, significant developments concerning the resurgence of trams and implementation of dedicated lanes or reserved bus lanes, including guided buses.

The evolution of mobility practices raises the question of their occupation of urban space that is not scalable and therefore the coexistence of all these modes. This coexistence leads to new risks that must be analyzed and for which new solutions must be developed to reduce them. Moreover, the question of the relationship between these modes with a view to optimizing the travels is also important to consider.

The user population said vulnerable is very large, and in the context of this paper, we discuss this particular concept in terms of " vulnerable mode (eg, two-wheeled motorized or not, pedestrians and other soft modes) but also in terms of "disability" in a broad sense to cover in particular the elderly, individuals with visual impairments and people using wheelchairs.

Taking into account the characteristics of this population in the study of classical modes (car, two wheels ...) or new forms of mobility should focus on risks but also on factors that dictate behavior intermodality. Indeed, it is people who do not have a wide range of possible transport modes identical to those who enjoy all their functional capabilities.

The new practices of mobility rely increasingly on mobile information systems more or less complex and more or less adapted to the travel modes chosen. We will therefore also focus on the risks that can create new use of these communication and assistance tools by those different categories of people.

Keywords: Urban mobility, Transport Modes, Vulnerable Users, Handicap.

SESSION 1

Caractérisation du risque routier vis à vis de l'infrastructure

Co-animateurs : Xavier Cocu (CRR, BE) et André-Gilles Dumont (EPFL, CH)

OUTILS D'EVALUATION DE LA VISIBILITE NOCTURNE ET DE L'EBLOUISSEMENT SUR LES ROUTES NON ECLAIREES

E. DUMONT **R. BREMOND** **K. B. CHRISTIANSON** **D. S. GREENHOUSE**

Université Paris-Est,
LEPSiS, INRETS-LCPC,
Paris, France

UC Berkeley,
Visual Detection Lab,
Berkeley, California

Résumé

De nuit sur route non éclairée, seuls les phares permettent au conducteur d'anticiper sa trajectoire. Malheureusement, ils sont également susceptibles d'éblouir les usagers en sens inverse. Maximiser la visibilité tout en minimisant l'éblouissement est donc un défi pour les équipementiers automobiles. Néanmoins, il est également de la responsabilité du gestionnaire de la route d'évaluer la qualité de service de son réseau, et de mettre en place des contre-mesures aux endroits où des problèmes sont identifiés. Pour les y aider, nous proposons deux outils complémentaires pour évaluer l'éblouissement et la visibilité de nuit sur les routes non éclairées : une méthode de calcul du niveau d'éblouissement à partir d'images de scènes routières mesurées avec un vidéo-photomètre, et une méthode de calcul de la distance de visibilité nocturne à partir du coefficient de rétro-réflexion du revêtement de chaussée mesuré avec l'appareil à grand rendement ECODYN (mlpc®).

Mots-clés: visibilité, éblouissement, phares, route, nuit, luminance, rétroréflexion, mesure.

Abstract

Headlamps provide guidance and visibility to the driver at night, but they also cause glare to oncoming drivers. While providing maximum visibility to the driver without disabling other road users is a challenge for vehicle lighting designers, it is also the responsibility of highway operators to monitor their network and implement countermeasures where visibility or glare problems are diagnosed. We propose two complementary monitoring tools to help road operators assess headlight glare and visibility levels on highways devoid of road lighting: a computational model for the level of headlight glare based on luminance maps grabbed with an imaging photometer, and a computational method for the headlight visibility distance based on pavement retroreflectivity as measured along the roadway by ECODYN (mlpc®).

Keywords: visibility, glare, headlight, highway, night, luminance, retroreflectivity, measurement.

1. Introduction

Près du tiers des accidents de la route se produisent la nuit, alors que la circulation nocturne représente seulement 10% de la circulation totale (ONISR, 2008). Ces statistiques de l'Observatoire national interministériel de la sécurité routière sont relativement stables d'une année sur l'autre. Elles montrent clairement l'enjeu que représente la circulation nocturne en termes de sécurité routière. Même si ce n'est pas le seul facteur en cause (on peut notamment citer l'alcool), l'absence d'éclairage naturel contribue largement au problème. En effet, la perte de visibilité qui en découle perturbe les performances et le comportement des usagers de la route de manière significative (CIE, 1993 ; Wanvik, 2009).

Pour pallier cette perte de visibilité et rendre possible la circulation de nuit, tous les véhicules sont réglementairement équipés de phares. En éclairant la route et les abords, ces sources lumineuses doivent permettent aux conducteurs d'anticiper des difficultés éventuelles et d'adapter leurs comportements. Idéalement, les phares devraient éclairer la route comme en plein jour, mais se pose le problème de l'éblouissement des autres usagers, et notamment des conducteurs circulant en sens inverse. Les feux de croisement, conçus pour maximiser la visibilité tout en minimisant l'éblouissement, sont une réponse à ce problème. Néanmoins, basés sur un compromis, ils ne constituent pas une panacée.

La visibilité mobilisable par les conducteurs en conditions nocturnes ne dépend toutefois pas uniquement des performances des phares. La route et ses équipements ont également un rôle important sur ce plan. De fait, la distance de visibilité figure en bonne place dans la doctrine technique relative à l'aménagement des routes (SETRA, 1994). Néanmoins, s'il existe des systèmes permettant de relever la distance de visibilité géométrique le long d'un itinéraire, les gestionnaires ne disposent à ce jour d'aucun moyen pour caractériser la visibilité offerte aux usagers nocturnes sur leurs réseaux.

Dans le présent article, nous proposons deux outils complémentaires visant à identifier les problèmes de visibilité nocturne et d'éblouissement sur les routes non éclairées, afin de pouvoir localiser les zones à risque et décider des solutions à déployer. Le premier outil est une méthode de calcul du niveau d'éblouissement à partir d'images de scènes routières mesurées avec un vidéo-photomètre. Le second outil est une méthode de calcul de la distance de visibilité nocturne à partir du coefficient de rétro-réflexion du revêtement de chaussée, mesuré avec l'appareil à grand rendement ECODYN (mlpc®). L'article décrit les deux méthodes de calcul, présente des exemples de leur mise en œuvre, et discute des travaux à mener pour les rendre opérationnels.

2. Évaluation de l'éblouissement

L'éblouissement est un phénomène complexe qui se caractérise par deux types d'effet, parfois concomitants : l'éblouissement inconfortable (sentiment de gêne visuelle) et l'éblouissement perturbateur (réduction des performances visuelles).

2.1 Indicateurs d'éblouissement

Éblouissement inconfortable

L'éblouissement inconfortable est un phénomène subjectif, généralement transitoire, dont les mécanismes sont encore indéterminés. Parmi les indices utilisés pour l'évaluer, le plus courant est l'échelle de De Boer, qui comprend des niveaux allant de 1 pour insupportable à 9 pour négligeable (Vos, 2003).

Éblouissement perturbateur

L'éblouissement perturbateur est un phénomène objectif généré par la diffusion de la lumière dans les yeux, qui se traduit par une diminution de la sensibilité au contraste. Il est établi que l'effet est équivalent à celui d'un voile lumineux uniforme se superposant à la distribution de luminance de la scène observée. L'importance de ce phénomène dépend de plusieurs paramètres, parmi lesquels l'intensité de la source éblouissante, son excentricité par rapport à la direction du regard, ainsi que l'âge de l'observateur. La CIE (2002) propose une formule normalisée qui permet de calculer la luminance de voile équivalente en fonction de ces paramètres.

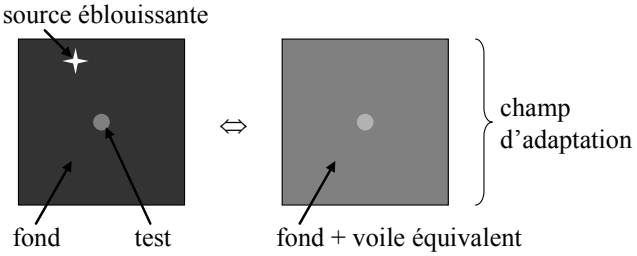


Figure 1 – La présence d'une source éblouissante dans le champ de vision induit une réduction de la sensibilité au contraste équivalente à celle que produirait un voile lumineux uniforme (CIE, 2002).

2.2 Méthode de mesure

Le niveau d'éblouissement subi par un conducteur, qu'il soit inconfortable ou perturbateur, est déterminé par la distribution de luminance dans son champ de vision, luminance qui constitue le signal d'entrée du système visuel. Nous proposons donc d'évaluer l'éblouissement en analysant cette distribution de luminance, qu'il est possible de mesurer avec un vidéo-photomètre. Les résultats présentés ont été obtenus avec un vidéo-photomètre Radiant Imaging PR-1613F-2. Les calculs ont été confrontés à des observations, non pour valider les modèles sous-jacents (ce qui aurait nécessité un nombre plus important de sujets), mais pour vérifier la conformité de leur mise en œuvre.

Pour quantifier l'éblouissement inconfortable, nous commençons par localiser les sources éblouissantes dans l'image de la scène. Connaissant leur position et leur luminance, nous utilisons la méthode décrite par Baer (2006) pour évaluer un indice d'inconfort. Nous appliquons ensuite une méthode décrite par Vos (2003) pour convertir cet indice en un score sur l'échelle de De Boer. Cette méthode de calcul de l'éblouissement inconfortable a été validée par une série d'expériences de laboratoire. Des photographies de scènes routières nocturnes ont été présentées sur un moniteur à 15 sujets, en présence ou en l'absence d'éblouissement. L'éblouissement était généré au moyen d'une source de type LED de forte intensité placée devant le moniteur pour simuler les phares d'un véhicule en sens inverse, source dont on faisait varier la position et l'intensité. Nous avons obtenu une bonne correspondance entre les scores subjectifs produits par les sujets et les scores objectifs calculés avec l'outil d'évaluation de l'éblouissement inconfortable proposé.

Pour quantifier l'éblouissement perturbateur, nous procédons à une analyse point par point de l'image de la scène, en quantifiant la contribution de chaque point à la luminance de voile équivalente à l'aide de l'équation normalisée de la CIE (2002), puis en intégrant les résultats sur toute l'image. Nous avons testé et validé cet outil par une série d'expériences en laboratoire dans lesquelles des sujets devaient effectuer une tâche de détection au seuil sur un moniteur. Le stimulus visuel était un disque gris foncé présenté sur un fond noir avec un arrière plan gris. Les sujets devaient incrémenter la luminance du disque jusqu'à le rendre juste visible par rapport au fond, avec ou sans éblouissement. L'éblouissement était généré au moyen du dispositif décrit

précédemment. Le seuil de contraste a ainsi pu être mesuré dans différentes conditions d'intensité et d'excentricité de la source éblouissante, pour 15 sujets d'âges différents. Les résultats ont montré que la luminance de voile équivalente calculée par l'outil de mesure de l'éblouissement perturbateur était bien corrélée à la valeur déterminée expérimentalement.

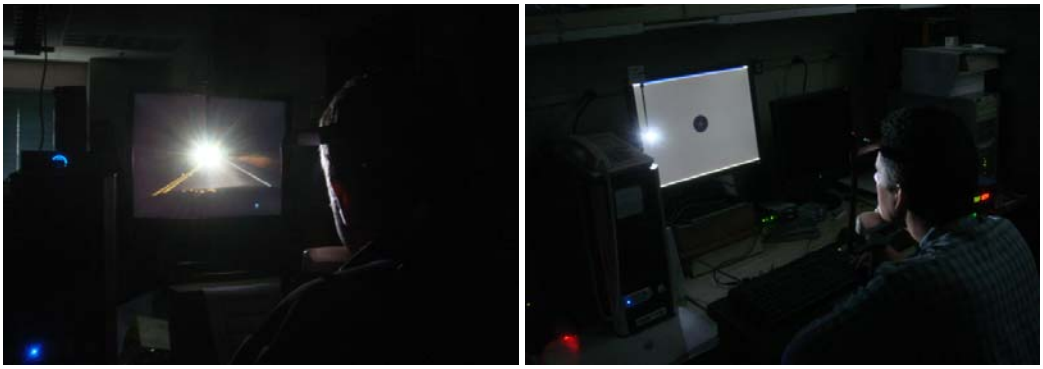


Figure 2 – Expériences psychovisuelles menées en laboratoire pour vérifier le calcul du niveau d'éblouissement inconfortable (à gauche) et perturbateur (à droite) par analyse d'images en luminance.

2.3 Résultats

Après avoir testé et vérifié l'outil de mesure de l'éblouissement en laboratoire, nous avons effectué des tests sur le terrain, en site protégé (à Richmond, en Californie). Au cours de ces tests, deux observateurs devaient évaluer l'inconfort généré par les phares d'un véhicule (immobile) dans différentes conditions : phares en position feux de route ou feux de croisement, avec ou sans éclairage public, avec ou sans écran anti-éblouissement, et avec un pare-brise propre ou sale. Les résultats ont confirmé la correspondance entre les scores fournis par les sujets et les scores calculés avec l'outil de mesure de l'éblouissement inconfortable proposé.

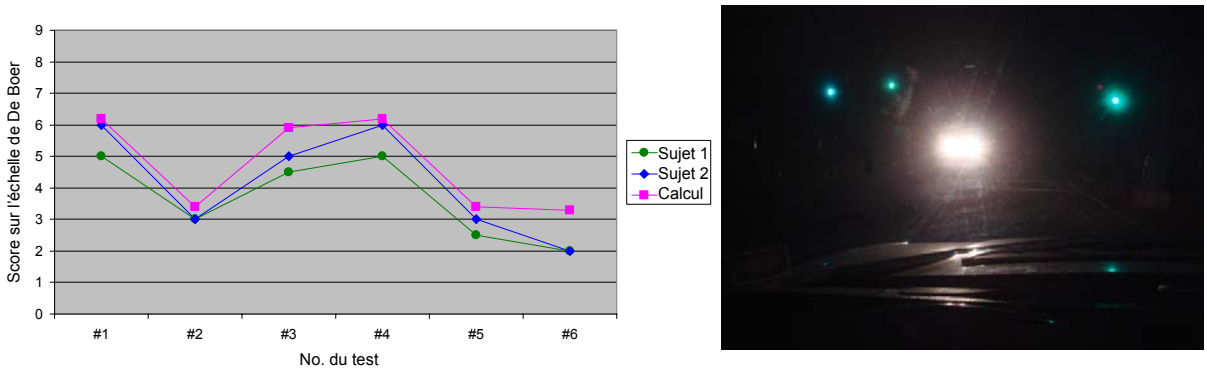


Figure 3 – Comparaison des niveaux d'inconfort évalués par deux sujets (en vert et en bleu) avec le niveau estimé à l'aide de l'outil de mesure de l'éblouissement inconfortable proposé (en magenta), dans six conditions d'observation.

Nous avons également tenté de tester l'estimation de l'éblouissement perturbateur, mais la piste n'était pas assez longue pour atteindre le seuil de visibilité de la cible en conditions statiques.

3. Relevé de la visibilité nocturne

3.1 Indicateur de visibilité nocturne

L'approche proposée pour caractériser la visibilité nocturne est inspirée des pratiques en conception de systèmes d'éclairage. L'éclairage public et l'éclairage automobile ont le même

objectif : permettre aux usagers de la route de voir la signalisation (horizontale pour le guidage, verticale pour la navigation) et les obstacles lorsqu'ils circulent la nuit. La différence tient au fait qu'une installation d'éclairage routier peut être optimisée en tenant compte des propriétés photométriques du revêtement de la chaussée éclairée (Dumont, 2007), tandis que les phares sont susceptibles de rencontrer toutes sortes de revêtements sur diverses routes. Nous proposons donc d'évaluer l'impact du revêtement de chaussée sur la distance de visibilité d'un obstacle potentiel éclairé par les phares. Pour ce faire, nous adoptons un scénario conventionnel très largement utilisé par les concepteurs d'éclairage pour la route (IESNA, 2005) et l'automobile (Olson et al., 1990) : la détection d'une petite cible sur la chaussée.

Dans le scénario considéré, le conducteur circule à la vitesse réglementaire. La hauteur de ses yeux et la hauteur des phares de son véhicule par rapport au sol sont fixées par convention à respectivement 1,20 m et 0,65 m, valeurs retenues dans l'action européenne COST 331 (1999) sur la visibilité des marquages. Pour la photométrie des phares, nous utilisons par convention la distribution d'intensité médiane d'un échantillon représentatif des phares du parc automobile européen, mesurée au début des années 2000 (Schoettle et al., 2001). Pour l'obstacle à détecter, nous utilisons par convention un carré de 18 cm de côté, de couleur gris-sombre caractérisée par un facteur de luminance de 8%, placé verticalement sur la chaussée au centre de la voie devant le véhicule.

Selon le modèle empirique d'Adrian (1989), basé notamment sur les données expérimentales de Blackwell (1946) sur la vision du contraste, la visibilité d'un objet dépend principalement de la différence de luminance ΔL entre cet objet et l'arrière-plan, et de la luminance d'adaptation de l'observateur (Figure 1). Globalement, on peut considérer que plus l'environnement est lumineux, plus la différence de luminance doit être grande pour qu'un objet soit détectable. Pour des raisons d'acuité visuelle, la visibilité de l'objet dépend également de sa taille angulaire. Le modèle d'Adrian permet de calculer la différence de luminance minimale pour qu'un objet soit détectable en fonction de sa taille apparente et de la luminance d'adaptation. Des facteurs correctifs permettent de tenir compte de paramètres supplémentaires tels que le temps d'observation et l'âge de l'observateur. Le niveau de visibilité V de l'objet est défini comme le rapport entre la différence de luminance constatée et la différence de luminance minimale ainsi calculée. La condition $V \geq 1$ est théoriquement suffisante pour garantir la visibilité de l'objet, mais les praticiens introduisent un « facteur terrain » pour tenir compte de la complexité de la tâche de conduite par rapport aux conditions de laboratoire. Par convention, nous utilisons la condition $V \geq 7$ recommandée par l'AFE (2002) pour définir le seuil de visibilité de la cible en situation de conduite de nuit.

Ayant fixé les paramètres géométriques et photométriques du scénario conventionnel, il est possible de calculer le niveau de visibilité de la cible considérée en fonction de sa distance par rapport aux phares, et ce en tout point d'un itinéraire, à condition de connaître le coefficient de luminance rétro-réfléchie R_L du revêtement (Brémond et al., 2007). Ce paramètre permet en effet, connaissant l'intensité émise par les phares, de calculer la luminance de la chaussée. On distingue deux cas :

- le conducteur circule seul sur la route, en feux de route ; la luminance d'adaptation est alors prise égale à la luminance de fond, elle-même égale à la luminance de la chaussée au pied de la cible.
- le conducteur est confronté à un véhicule en sens inverse, situé à la même distance que la cible, et circule en feux de croisement ; la luminance d'adaptation est alors prise égale à la somme de la luminance de la chaussée et de la luminance de voile résultant de l'éblouissement perturbateur (§ 2.1) généré par les phares du véhicule croisé.

Dans les deux cas, la distance de visibilité nocturne est définie comme la distance à laquelle le niveau de visibilité de la cible considérée est égal au seuil choisi, comme l'illustre la Figure 4.

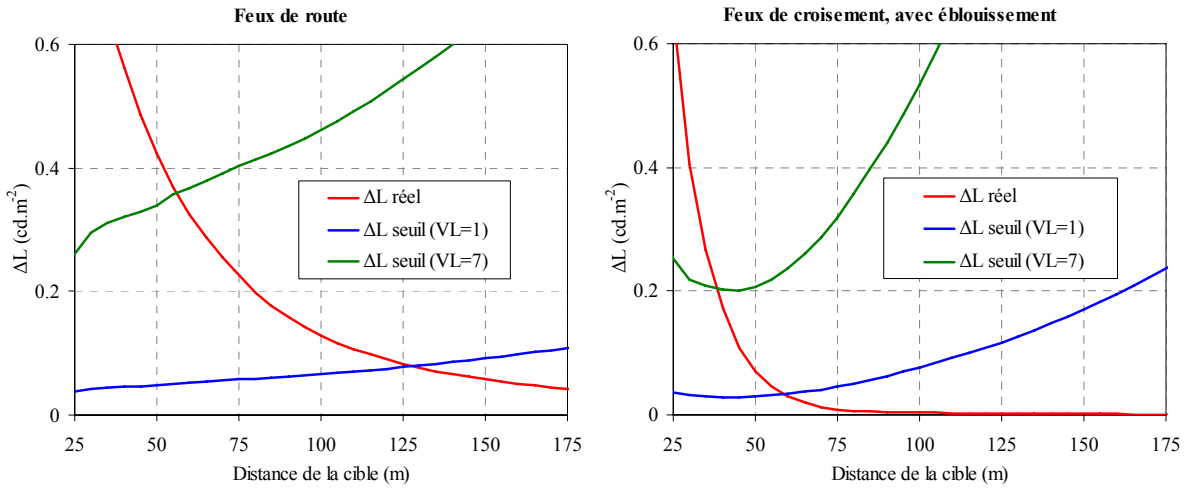


Figure 4 – Différence de luminance réelle (en rouge) et différence de luminance détectable (en bleu pour un observateur en laboratoire, en vert pour un conducteur) en fonction de la distance pour un revêtement dont le coefficient de luminance rétro-réfléchie est de 15 mcd.m^{-2}.lx^{-1}. La distance de visibilité de la cible considérée est donnée par l'intersection des deux courbes. En feux de route sans trafic (à gauche), elle est de 56 m. En feux de croisement avec véhicule en face (à droite), elle tombe à 38 m.

3.2 Méthode de mesure

Pour calculer la distance de visibilité nocturne selon le principe qui vient d'être présenté, il suffit de connaître le coefficient de luminance rétro-réfléchie de la chaussée. Or il existe un appareil à grand rendement qui permet de mesurer ce paramètre, quoiqu'il ait été conçu et qu'il soit habituellement employé pour caractériser la qualité de service de la signalisation horizontale. Il s'agit de l'appareil mlpc® ECODYN, présenté en Figure 5.

La mesure est effectuée tous les 40 cm, dans n'importe quelle condition d'éclairage, selon une géométrie définie par la norme européenne EN 1436 sur la performance des marquages : l'angle d'éclairage est de 1,24° et l'angle d'observation est de 2,29°. Cette géométrie correspond à une distance d'environ 30 m devant le véhicule. On ne devrait donc pouvoir calculer la luminance de la chaussée qu'à cette distance. Toutefois, des études passées ont montré que le coefficient de luminance rétro-réfléchie sous éclairage automobile du revêtement de chaussée, quelle que soit sa nature, est relativement indépendant de la distance en conditions sèches (Hubert et Canestrelli, 1985). Selon le type de revêtement, le coefficient de luminance rétro-réfléchie prend habituellement des valeurs comprises entre 5 et 15 mcd.m^{-2}.lx^{-1}, mais il arrive qu'il dépasse 40 mcd.m^{-2}.lx^{-1} dans le cas d'enduits superficiels clairs.

Dans le cas des marquages, les mesures sont habituellement intégrées sur des sections de 150 m pour faciliter l'interprétation par les gestionnaires. Pour notre application, les mesures sont débruitées à l'aide d'un filtre médian appliqué sur une base glissante de 50 m. Un exemple de profil de R_L de chaussée mesuré avec l'appareil ECODYN est présenté dans la Figure 6. La section de la chaussée comprise entre les abscisses 1 500 et 2 800 m est dotée d'un revêtement plus récent, et donc plus sombre et plus uniforme.

Figure 5 – Le système ECODYN (mlpc®) permet de mesurer le coefficient de luminance rétro-réfléchie du revêtement de la chaussée le long d'un itinéraire.

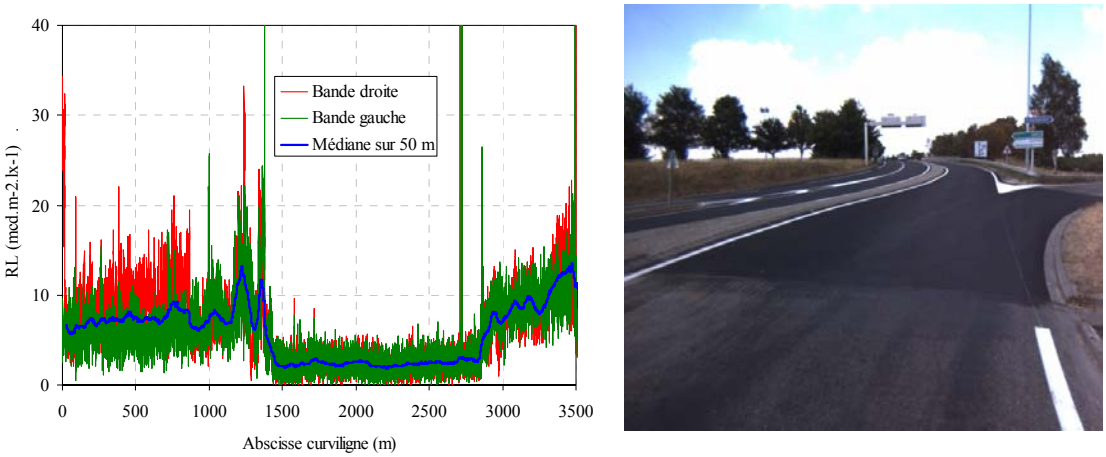


Figure 6 – Coefficient de luminance rétro-réfléchie mesuré avec l'appareil ECODYN le long d'une section de route de 3,5 km dotée d'un revêtement en béton bitumineux (à proximité de Strasbourg). La photographie à droite montre le changement de revêtement qui explique la rupture de R_L à partir de l'abscisse 1 500 m.

3.3 Résultats

Le LRPC de Strasbourg a effectué des mesures ECODYN sur plusieurs sections de route, et nous avons évalué l'indicateur de visibilité nocturne défini précédemment. Les résultats, présentés dans la Figure 7, donnent une idée des variations de la rétro-réflexion de la chaussée le long d'une route, et de l'évolution de la distance de visibilité nocturne qui en résulte pour un conducteur en feux de route.

Nous avons également calculé les distances de visibilité nocturne associées au profil présenté dans la Figure 6. Les résultats, présentés dans la Figure 8, montrent que la zone sur laquelle le revêtement est plus sombre offre une plus grande distance de visibilité nocturne aux usagers, et leur laisse donc plus de temps pour réagir face à la présence d'un obstacle sur la chaussée. On observe également des pics de rétro-réflexion au niveau desquels la distance de visibilité nocturne tombe à 65 m en condition de feux de route. Cette distance reste acceptable si on la compare aux 2 s de sécurité généralement préconisées, qui correspondent à une distance de 50 m à la vitesse de 90 km/h. Néanmoins, lorsque le conducteur rencontre du trafic en sens inverse et passe en feux de croisement, la distance de visibilité mobilisable tombe en-dessous de ce seuil. Et si le conducteur oublie de repasser en feux de route, la distance de visibilité mobilisable remonte tout juste au niveau de la distance de sécurité. Ces résultats s'appliquent dans le cas d'un jeune

conducteur, mais si l'on considère un conducteur plus âgé, comme le permet un des facteurs correcteurs du modèle d'Adrian, on constate que sur des sections où le R_L dépasse 10 mcd.m^{-2}.lx^{-1}, il pourrait être surpris face à la présence d'un objet sombre qu'il ne détecterait que tardivement.

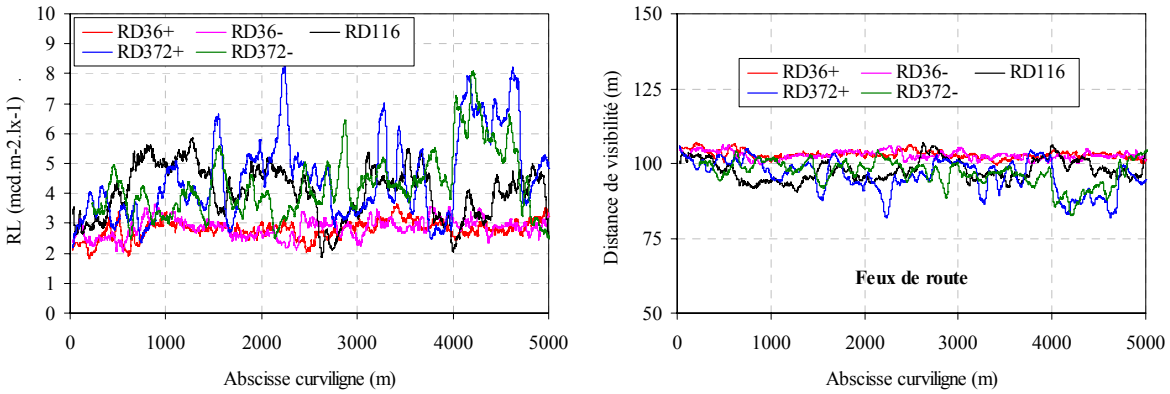


Figure 7 – Exemples de profils de R_L de chaussée mesurés avec l'appareil ECODYN (à gauche), et profils de distance de visibilité nocturne calculés pour une circulation en feux de route (à droite).

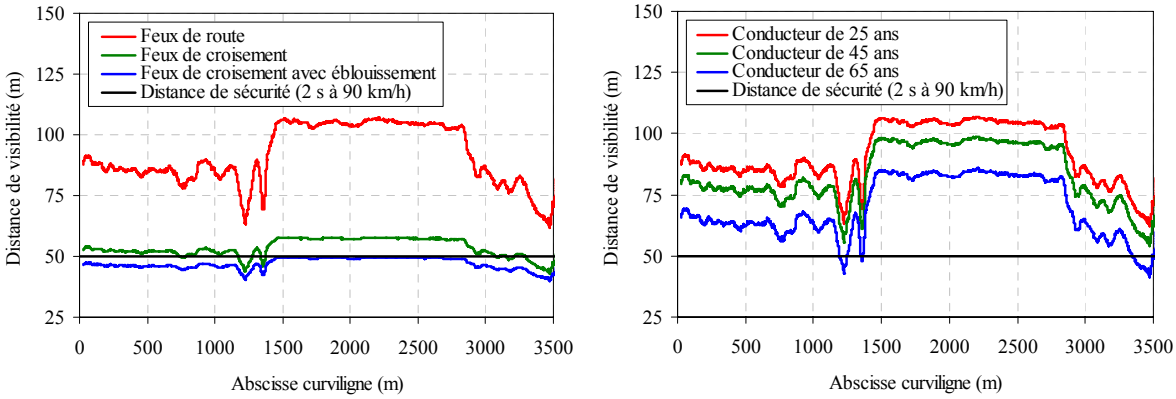


Figure 8 – Effets des conditions de circulation (à gauche) et de l'âge du conducteur (à droite) sur le profil de visibilité nocturne le long de la section de route présentée dans la Figure 6.

4. Conclusions et perspectives

Nous proposons deux outils complémentaires pour évaluer la visibilité et l'éblouissement de nuit sur les routes non éclairées : une méthode d'évaluation de la distance de visibilité nocturne à partir du coefficient de luminance rétro-réfléchie du revêtement de chaussée mesuré avec l'appareil à grand rendement ECODYN (Dumont et al., 2009), et une méthode d'évaluation du niveau d'éblouissement à partir d'images de scènes routières mesurées avec un vidéo-photomètre (Christianson et al., 2009). Pour plus de détails concernant les principes et les hypothèses sur lesquels reposent ces deux outils, le lecteur pourra se référer aux deux rapports précités. Leur point faible principal et commun tient dans leur nature conventionnelle, consistant à qualifier une diversité quasiment infinie de situations routières avec un nombre limité de scénarios. D'autre part, les hypothèses utilisées pour fixer les paramètres des modèles mis en œuvre, tels que la luminance d'adaptation, nécessitent des recherches complémentaires.

L'outil de mesure de l'éblouissement est destiné à évaluer la gêne subie la nuit par les conducteurs lorsqu'ils croisent d'autres véhicules. Plusieurs étapes ont été franchies pour rendre cet outil opérationnel, mais certaines difficultés limitent encore son utilisation sur le terrain.

L'analyse des images de la scène n'est pas entièrement automatique, et nécessite encore l'intervention d'un expert, ce qui constitue un obstacle au déploiement de l'outil. Mais le principal problème est lié au système d'acquisition des images en luminance, qui exige actuellement plusieurs prises de vue avec différents temps d'exposition pour capturer toute la dynamique lumineuse de la scène routière. Cette contrainte impose des conditions d'éclairage et d'observation statiques difficilement compatibles avec une mise en œuvre opérationnelle. Toutefois, des solutions techniques commencent à émerger pour pallier ce problème, ouvrant des perspectives pour l'utilisation de systèmes embarqués tels que le dispositif Cyclope du LRPC d'Angers (Fournela et al., 2006).

L'outil de mesure de la visibilité nocturne est destiné à aider les gestionnaires routiers à localiser les zones de leurs réseaux sur lesquelles les usagers circulant de nuit risquent de ne pas pouvoir détecter un obstacle sur la chaussée à temps pour l'éviter, particulièrement lorsqu'ils sont gênés par les phares des véhicules en sens inverse. Avant d'envisager une mise en œuvre opérationnelle, cet outil doit être qualifié. Pour ce faire, nous proposons de sélectionner et d'étudier une ou plusieurs sections d'itinéraire non éclairées sur lesquelles le gestionnaire a observé des sur-accidents de nuit, de relever le profil de visibilité nocturne sur ces sections, et d'analyser les résultats en collaboration avec un expert en sécurité routière. Cela permettrait de démontrer le bien-fondé de l'indicateur de visibilité proposé, et de le calibrer en fixant un seuil pertinent. Dans un second temps, l'outil pourra être amélioré en tenant compte de la géométrie du tracé (pente, rayon) dans la méthode de calcul. Enfin, au-delà de leur intérêt pour le diagnostic de qualité de la route, les données relevées pourront être utilisées par les futurs systèmes coopératifs pour la sécurité, comme paramètre d'entrée des systèmes d'aide à la conduite ou des systèmes d'éclairage adaptatif des véhicules.

Une fois qualifiés, les deux outils pourront être utilisés de manière complémentaire. En effet, le profil de visibilité nocturne permettra d'abord de cibler les points d'un itinéraire où l'éblouissement par les phares constitue un risque potentiel pour les conducteurs, et qui nécessitent une analyse plus précise. Le niveau d'éblouissement permettra ensuite de vérifier l'importance du problème et, dans le cas où le gestionnaire installe des contre-mesures telles que les écrans anti-éblouissement ou l'éclairage public (Mace et al., 2001), d'évaluer leur efficacité.

Remerciements

L'outil de mesure de l'éblouissement a été développé dans le cadre d'un projet financé par le California PATH (TO #6603). L'outil de mesure de la visibilité nocturne a été développé dans le cadre du projet VIZIR de l'action fédérative SARI, avec un financement du PREDIT (DA n°05MT6039). La complémentarité entre les deux outils a été étudiée dans le cadre de la collaboration CalFrance entre le département des transports californien et le ministère des transports français. Les auteurs remercient Joseph E. Barton, Christina Chow, Hicham Choukour et Yannick Guillard pour leur contribution aux travaux présentés.

Références

- Adrian, W. (1989), "Visibility of Targets: Model for Calculation, Lighting Research and Technology", 21(4), 181-188.
- AFE (2002), « Recommandations relatives à l'éclairage des voies publiques », Lux, Paris.
- Baer, R. (2006), Beleuchtungstechnik: Grundlagen, Huss-Medien, Berlin.
- Blackwell, H.R. (1946), "Contrast Threshold of the Human Eye", Journal of the Optical Society of America, 36(11), 624-643.

- Brémond, R., Choukour, H., Dumont, E. and Guillard, Y. (2007), "A Night-time Visibility Index for the Diagnosis of Rural Road Networks", Proceedings of the 26th Session of the CIE, CIE, Vienne, D4:104-107.
- Christianson, K.B., Greenhouse, D.S., Barton, J.E. and Chow, C. (2009), "Methods to Address Headlight Glare", University of California Berkeley, final report.
- CIE (1993), "Road Lighting as an Accident Countermeasure", CIE, Vienne, publication No 93-1993.
- CIE (2002), CIE Equations for Disability Glare, CIE, Vienne, publication No 146-2002.
- COST 331 (1999), Requirements for Horizontal Road Marking, European Commission, Luxembourg, final report.
- Dumont, E. (2007), « Photométrie des chaussées et éclairage public », LCPC, Paris, rapport n° CR45.
- Dumont, E., Brémond, R., Choukour, H. and Guillard, Y. (2009), "A Nighttime Visibility Meter for Secondary Roads", LCPC, Paris, rapport technique.
- Fournela, F. and Greffier, F. (2006), « La perception visuelle de l'environnement par les usagers de la route », Actes des 4e Journées des Sciences de l'Ingénieur, LCPC, Paris, 48-53.
- Hubert, R. et Canestrelli, M. (1985), « Mesures de rétroréflexion sur chaussées sèches et mouillées », LCPC, Paris, rapport technique.
- IESNA (2005), "Roadway Lighting", IESNA, New York, No RP-8-00.
- Mace, D., Garvey P., Porter, R.J., Schwab, R. and Adrian, W. (2001), "Countermeasures for Reducing the Effects of Headlight Glare", AAA Foundation for Traffic Safety, Washington D.C., final report.
- Olson, P.L., Aoki, T., Battle, D.S. and Flannagan, M.J. (1990), "Development of a Headlight System Performance Evaluation Tool", UMTRI, Ann Arbor, Report No 90-41.
- ONISR (2008), « La sécurité routière en France : bilan de l'année 2008 », La documentation française, Paris.
- SETRA (1994), Aménagement des routes principales (ARP), Guide technique, SETRA, Bagneux.
- Schoettle, B., Sivak, M. and Flannagan, M.J. (2001), "High-Beam and Low-Beam Headlighting Patterns in the U.S. and Europe at the Turn of the Millennium", UMTRI, Ann Arbor, report No 2001-19.
- Sivak, M. (1996), "The information that drivers use: is it indeed 90% visual ?", Perception, 25(9), 1081-1089.
- Vos, J.J (2003), "On the cause of disability glare and its dependence on glare angle, age and ocular pigmentation", Clinical and Experimental Optometry, 86(6), 363-370.
- Wanvik, P.O. (2009), "Effects of road lighting: An analysis based on Dutch accident statistics 1987-2006", Accident Analysis and Prevention, 41, 123-128.

SUR LE DIAGNOSTIC DE LA VISIBILITE DE LA ROUTE

Ingénieur ESSI (Université de Nice Sophia Antipolis) en 1991, docteur en sciences pour l'ingénieur de l'Université de Nice Sophia Antipolis (1994). Depuis 2005, responsable de l'ERA27 au Laboratoire Régional de Strasbourg.

Ingénieur civil des ponts et chaussées (ENPC 1991), docteur en mathématiques appliquées à l'université Paris Dauphine (1996). Depuis 2004, chercheur au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) à Paris.

Pierre CHARBONNIER
ERA 27, LCPC CETE de l'Est
Strasbourg, France

Jean-Philippe TAREL
LEPSIS, INRETS-LCPC
Paris, France

Résumé
La distance de visibilité de la route joue un rôle important pour la sécurité routière et en particulier, a un impact évident sur le choix des limites de vitesse. Alors que les critères de visibilité sont systématiquement pris en compte lors de la conception des routes, seuls quelques systèmes existent actuellement pour estimer la distance de visibilité sur un réseau routier existant. Pour la plupart, les systèmes opérationnels comportent un véhicule cible suivi à distance constante par un véhicule d'observation. De tels procédés permettent seulement de vérifier si une distance de visibilité fixe est disponible. Nous proposons deux nouvelles approches qui permettent d'estimer la distance de visibilité disponible, à partir d'un seul véhicule et fondées sur différentes technologies de capteurs, à savoir la stéréovision binoculaire et un capteur 3D laser (LIDAR). Ces approches ont été développées dans le cadre du projet SARI-VIZIR du PREDIT. Les deux approches sont décrites, évaluées et comparées. Leurs avantages et inconvénients par rapport au système avec véhicule suiveur sont également discutés.

Mots-clés: Sécurité routière, inspection de la route, véhicule d'inspection, distance de visibilité, stéréovision, Lidar.

Abstract
Visibility distance on the road pathway plays a significant role in road safety and in particular, has a clear impact on the choice of speed limits. While visibility distance criteria are routinely taken into account in road design, only a few systems exist for estimating it on existing road networks. Most existing systems comprise a target vehicle followed at a constant distance by an observer vehicle, which only allows checking if a fixed visibility distance is available. We propose two new approaches that allow estimating the available visibility distance, involving only one vehicle and based on different sensor technologies, namely binocular stereovision and 3D range sensing (LIDAR). These approaches were developed in the context of the SARI-VIZIR PREDIT project. Both approaches are described, evaluated and compared. Their pros and cons with respect to vehicle following systems are also discussed.

Keywords: Road Safety, Road inspection, Inspection vehicle, Visibility distance, Stereovision, Lidar.

1. Introduction

Nous abordons le problème de l'évaluation de la distance de visibilité le long d'une route existante. Parmi les nombreuses définitions de la distance de visibilité existantes, nous considérons le scénario d'arrêt sur obstacle. Plus précisément, on définit la distance de visibilité requise comme celle nécessaire à un conducteur pour réagir à la présence d'un obstacle sur la chaussée et pour arrêter son véhicule. Cette distance dépend clairement de facteurs tels que le temps de réaction du conducteur et le coefficient d'adhérence de la route. Ces facteurs peuvent être choisis à une valeur conventionnelle correspondant au pire des cas. Ainsi, la valeur du temps de réaction est ici fixée à 2 secondes. Le coefficient d'adhérence est réglé sur une valeur correspondant à une route mouillée. La distance requise dépend aussi, naturellement, de la vitesse du véhicule, dont la valeur conventionnelle peut être choisie comme la V85, c'est-à-dire au 85ème centile de la distribution des vitesses. Naturellement, les statistiques des vitesses ne sont pas disponibles sur tout un parcours. Toutefois, nous pouvons utiliser les mêmes lois, issues d'études statistiques, (SETRA 2000, SETRA 1994), que pour la conception des routes et moduler une valeur fixe V85 conventionnelle (qui dépend du type d'itinéraire considéré) en fonction des caractéristiques géométriques de la route, à savoir la courbure et la pente.

Figure 1 – Le véhicule expérimental (photos CECP) et un couple d'images stéréo.

La distance de visibilité requise doit être comparée à la distance de visibilité disponible, qui est la distance maximale à laquelle un objet peut être vu sur la route en fonction de la géométrie de l'environnement routier. Nous proposons deux approches pour estimer avec précision la distance de visibilité disponible sur un trajet existant en tenant donc compte des sources d'occultations réelles comme les bâtiments et la végétation.

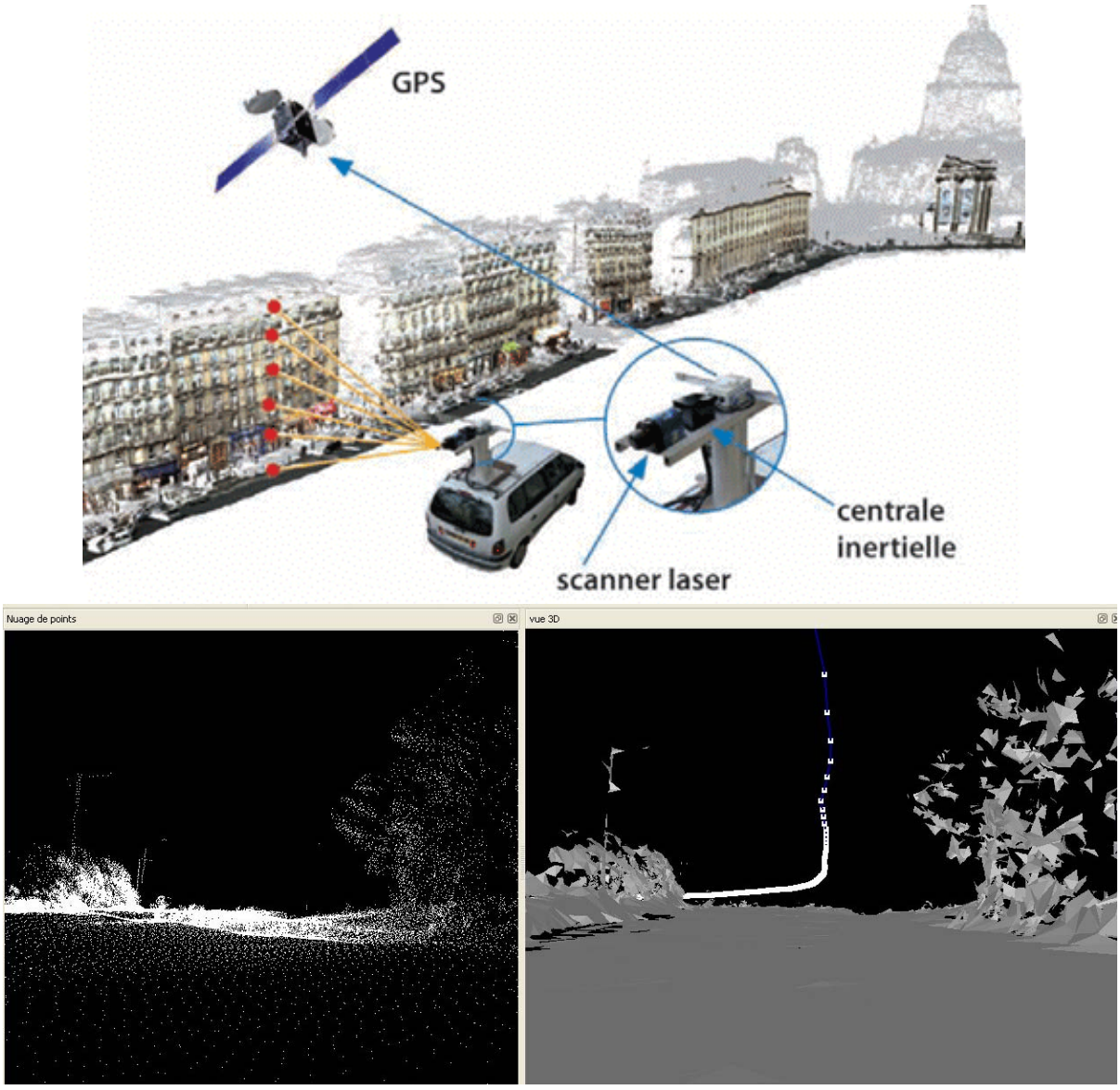


Figure 2 – Le véhicule expérimental LARA-3D du CAOR (Photo Mines ParisTech) avec un exemple de nuage de points 3D obtenu puis maillé.

Ces estimations sont donc différentes des distances de visibilité qui peuvent être calculées lors de la conception d'une route en utilisant des logiciels de conception de tracé routier comme Piste ou Macao. En effet, ce type de calculs est réalisé en supposant une occultation par un masque conventionnel placé à distance constante de la chaussée, tout le long de la route. Au contraire, nous prenons en compte les masquages réels rencontrés le long de l'itinéraire.

Comme l'évaluation de la visibilité de la route par les conducteurs est essentiellement une tâche visuelle, la première approche que nous proposons exploite les images acquises par des caméras montées sur un véhicule d'inspection (Figure 1). L'utilisation d'une seule caméra permettant seulement des mesures 2D, deux caméras sont nécessaires pour prendre en compte, grâce aux techniques de stéréovision, la forme 3D de la route lors de l'estimation de la distance de visibilité. Le système d'acquisition étant réduit à deux caméras couleur et un ordinateur, son coût est assez faible. Des paires stéréo (Figure 1) sont acquises tous les 5 mètres le long du parcours, le véhicule roulant à une allure normale, de façon à s'intégrer dans la circulation. Notons que, dans de telles

conditions (éclairement non contrôlé et présence de trafic), la reconstruction 3D demeure une tâche difficile.

Comme alternative, nous avons également étudié l'utilisation des données 3D fournies par un système LIDAR de cartographie mobile terrestre, appelé LARA-3D. Ce prototype est développé par le CAOR (Mines ParisTech) depuis plusieurs années, (Goulette et al., 2006). Son adaptation à la création de modèles 3D de route pour le calcul de la visibilité a été débutée au cours du projet SARI-VIZIR. Lorsque le véhicule se déplace, les points 3D échantillonnés le long de la route sont agglomérés (Figure 2). Le nuage de point ainsi généré est positionné dans un système de référence absolue grâce à l'utilisation de capteurs proprioceptifs (INS) et GPS. Plusieurs algorithmes ont été mis en œuvre afin de générer des modèles 3D comprenant un nombre aussi restreint que possible de facettes triangulaires, à partir des points. Pour supprimer les artefacts de mesure dus à la présence de véhicules, les informations de position du véhicule sur la route et la position approximative des frontières de la route sont utilisées. Pour réduire le nombre de facettes du modèle, un traitement en trois étapes est réalisé : une étape de décimation sur chaque profil scanné, puis une approche basée sur une croissance de région de zones planes obtenues par RANSAC, suivie d'une triangulation BPA, (Bernardini et al., 1999). Ces traitements conduisent à une réduction suffisamment importante du nombre de triangles (facteur 10 ou plus) pour que le modèle 3D puisse être utilisé ultérieurement pour le calcul de la distance de visibilité. Un exemple de modèle de l'environnement de la route est présenté (Figure 2).

Bien que le système d'acquisition soit plus complexe - et, par conséquent, plus coûteux - que dans l'approche par stéréovision, son avantage est que les données 3D sont directement capturées, avec une grande précision.

2. Distance de visibilité par la stéréovision binoculaire

En stéréovision, la distance de visibilité disponible est définie comme la distance maximum des points visibles sur les images de la route. Elle est estimée par trois étape de traitement de la paire d'images stéréo : segmentation de la chaussée dans chaque vue en utilisant des informations de couleur ; recalage entre les bords des régions correspondant à la chaussée dans les images de gauche et de droite, permettant d'estimer un modèle 3D de la surface de la route ; estimation de la distance maximale 3D de points visibles sur la route.

2.1 Segmentation de la route

La détection de la chaussée étant particulièrement importante pour une estimation correcte de la visibilité, la première étape du traitement consiste à classer chaque pixel, dans les vues gauche et droite, comme appartenant ou non à la route. Cette segmentation repose sur un apprentissage itératif le long de la séquence des caractéristiques de couleur des classes « route » et « non-route ».

Lors de l'étape d'apprentissage, les pixels situés au centre et en bas de chaque image sont considérés comme appartenant à la route tandis que les pixels en haut à gauche et à droite sont utilisés comme échantillons de la classe « non-route » (Figure 3 centre). Les couleurs de la route et de la région « non route » sont collectées sur les images précédentes lorsque le traitement est exécuté en temps réel. Il s'avère cependant plus avantageux de les recueillir sur les images suivantes, lorsque le traitement peut être effectué *hors ligne*. Cette stratégie permet de recueillir des échantillons à différentes distances à l'avant du véhicule.

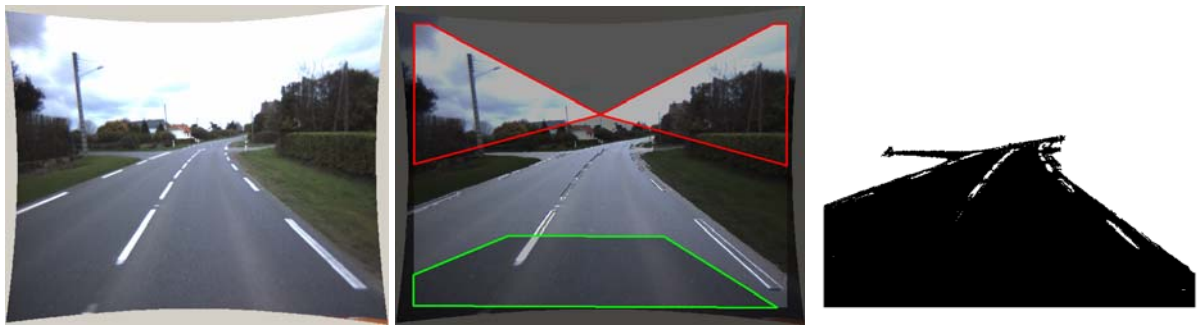


Figure 3 – A gauche : image originale ; au centre : en rouge, zone d'apprentissage de la classe « non route », en vert, *idem* pour la classe « route » ; à droite : résultat de la segmentation. Les pixels de la classe « route » apparaissent en noir.

Cela conduit à une amélioration de la segmentation particulièrement utile en présence de perturbations comme des ombres ou des variations de couleur de la chaussée. Une fois que les modèles de la route et de la région « non route » sont construits, l'image est segmentée en deux classes en utilisant un processus de croissance de la région route à partir de la partie centrale au bas de l'image. La figure 3 à droite présente un résultat de segmentation. Plus de détails sur cet algorithme peuvent être trouvés dans (Tarel et Bigorgne, 2009).

2.2 Recalage des contours et reconstruction du profil de la route

Les contours trouvés dans la région route de l'image gauche et de l'image droite diffèrent en position en raison du changement de point de vue. Cette différence de position est directement liée à la forme de la surface de la route.

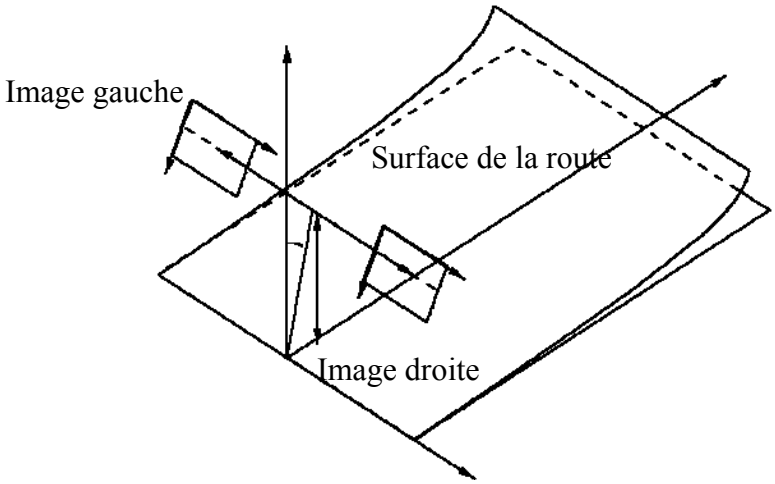


Figure 4 – Configuration géométrique pour l'estimation du profil de la route par stéréovision.

En supposant un modèle paramétrique polynomial de la surface de la route, et plus particulièrement de son profil en long, la deuxième étape consiste à recaler les contours extraits de l'image gauche avec ceux de la vue de droite, selon la configuration illustrée sur la figure 4 pour estimer les paramètres du profil. Cet algorithme est décrit en détails dans (Tarel et al., 2007) et se fonde sur un schéma itératif qui alterne entre l'appariement local des pixels de contours sous la forme d'un calcul de pondération et l'estimation proprement dite des paramètres du profil de route.

Figure 5 – Les contours en bleu sont ceux de l'image droite recalés dans l'image de gauche.

2.3 Estimation de la distance de visibilité géométrique

La surface 3D de la route ayant été estimée lors de la deuxième étape du traitement, la distance maximale à laquelle les bords gauche et droit ont pu être mis en correspondance fournit une estimation de la distance de la visibilité de la route. Des exemples de résultats sont présentés sur la figure 5, où les contours bleus sont ceux de l'image droite après recalage sur l'image gauche qui est affichée, et où la ligne rouge correspond à la hauteur de visibilité estimée dans chaque image. Comme expliqué en détail dans (Bigorgne et al., 2008), l'écart-type de l'estimateur est également calculé, afin de qualifier la valeur estimée de la distance de visibilité.

3. Distance de visibilité à partir d'un modèle 3D de la route et de ses environs

Dans cette approche, nous exploitons les données 3D triangulées fournies par le système LIDAR et la trajectoire obtenue par intégration GPS/INS pour estimer la distance de visibilité.

3.1 Estimation de la distance de visibilité à partir d'un modèle 3D

La définition de la distance de visibilité disponible que nous utilisons dans cette approche est purement géométrique et ne tient compte d'aucune considération photométrique ou météorologique. Elle implique seulement une cible et un observateur. La cible peut, soit être placée à une distance fixe du point d'observation, afin d'évaluer la disponibilité d'une certaine distance prescrite, ou s'éloigner d'elle jusqu'à ce qu'elle devienne invisible, pour estimer la distance de visibilité maximale sur le modèle 3D.

Des valeurs conventionnelles peuvent être trouvées dans la littérature concernant la conception des routes (SETRA, 2000) (SETRA, 1994), à la fois pour l'emplacement de l'observateur et pour la géométrie et la position de la cible. Le point de vue et la cible sont centrés sur l'axe des voies. Typiquement, le point de vue est situé à 1 mètre de haut, ce qui correspond approximativement à la hauteur d'œil moyenne des conducteurs. La cible conventionnelle est une paire de points représentant les feux arrière d'un véhicule. La cible est considérée visible aussi longtemps qu'au moins un point est visible, c'est à dire tant qu'il est possible de tracer une ligne droite entre le point de vue et l'un des points cible sans rencontrer aucun obstacle. De toute évidence, les algorithmes de lancer de rayon sont bien adaptés à cette tâche. Dans un souci de réalisme, nous avons également envisagé un parallélépipède (1,5 × 4 × 1,3 m) pour modéliser un véhicule. Dans ce cas, nous avons constaté qu'une bonne règle de base est de considérer une telle cible comme visible si 5% de sa surface est visible. Le seuil a été fixé expérimentalement, de telle sorte que les résultats de l'essai soient comparables à ceux obtenus lors de l'utilisation de la cible ponctuelle conventionnelle.

3.2 Qt-Ballad: un outil pour l'estimation de la visibilité

Nous avons développé un logiciel spécifique, appelé Qt-Ballad dans le cadre du projet SARI-VIZIR du PREDIT. Il permet la navigation dans le modèle 3D (qui peut être visualisé comme un nuage de points ou comme une surface maillée). La trajectoire de la route peut être visualisée dans le modèle 3D. Des cibles volumétriques ou ponctuelles peuvent être placées à différentes distances du point de vue. Afin de rendre plus facile l'interprétation de la scène routière, les images associées peuvent également être visualisées. Naturellement, toutes les vues sont synchronisées et l'interface est entièrement reconfigurable.

Qt-Ballad implémente les calculs de distance de visibilité requise et disponible. Dans le cas d'une cible ponctuelle, conventionnelle, nous utilisons un algorithme de lancer de rayon. Lorsqu'une cible volumétrique est considérée, nous exploitons les capacités de la carte graphique de l'ordinateur. Plus précisément, la cible est d'abord dessinée dans la mémoire graphique, puis la scène est rendue au moyen du Z-buffer et enfin, une requête d'évaluation des parties occultées (standard dans les implémentations actuelles d'OpenGL) fournit le pourcentage de la surface de cible visible. La distance de visibilité peut être calculée à chaque point de la trajectoire (chaque mètre) ou selon un pas fixe (généralement, 5 ou 10 mètres), afin d'accélérer les calculs. Deux façons différentes de calculer la visibilité sont mises en œuvre. Dans le premier cas, une distance constante est maintenue entre le point d'observation et la cible. La sortie est une fonction binaire qui indique en chaque position de l'itinéraire si la distance prescrite est disponible ou non. Dans le second cas, pour toute position du point d'observation, la cible est éloignée jusqu'à ce qu'on ne la voit plus et la distance maximum de visibilité disponible ainsi déterminée est alors enregistrée.

L'interface du logiciel est présentée sur la figure 6. Le panneau en haut à gauche affiche le nuage de point original. Le panneau en haut à droite montre le modèle triangulé (en gris), la trajectoire du véhicule (en bleu), ainsi qu'un parallélépipède figurant une cible volumique placée à 100 m à l'avant du véhicule (en vert). En bas à droite est affichée une image de la scène routière correspondante, acquise lors du relevé des données 3D. Notons que la vue 3D est affichée selon le point de vue du conducteur, tandis que l'image de la scène est prise depuis le mât placé sur le toit du véhicule. Finalement, le panneau en bas à gauche affiche la courbe de visibilité requise (en noir) et celle de la visibilité offerte estimée (en magenta), en fonction de l'abscisse curviligne. La ligne verticale indique la position courante le long de l'itinéraire. Les courbes montrent que la visibilité offerte est insuffisante dans cette situation. En effet, autour de la position indiquée par le curseur vertical, la visibilité requise est de l'ordre de 125 m, tandis que la visibilité offerte est de 120 m environ. Ainsi, la cible verte est visible lorsqu'elle est placée à 100 m dans le modèle 3D,

comme dans l'exemple proposé. Elle ne l'est plus au-delà des 120 m. Ce défaut de visibilité est lié à la présence du talus.

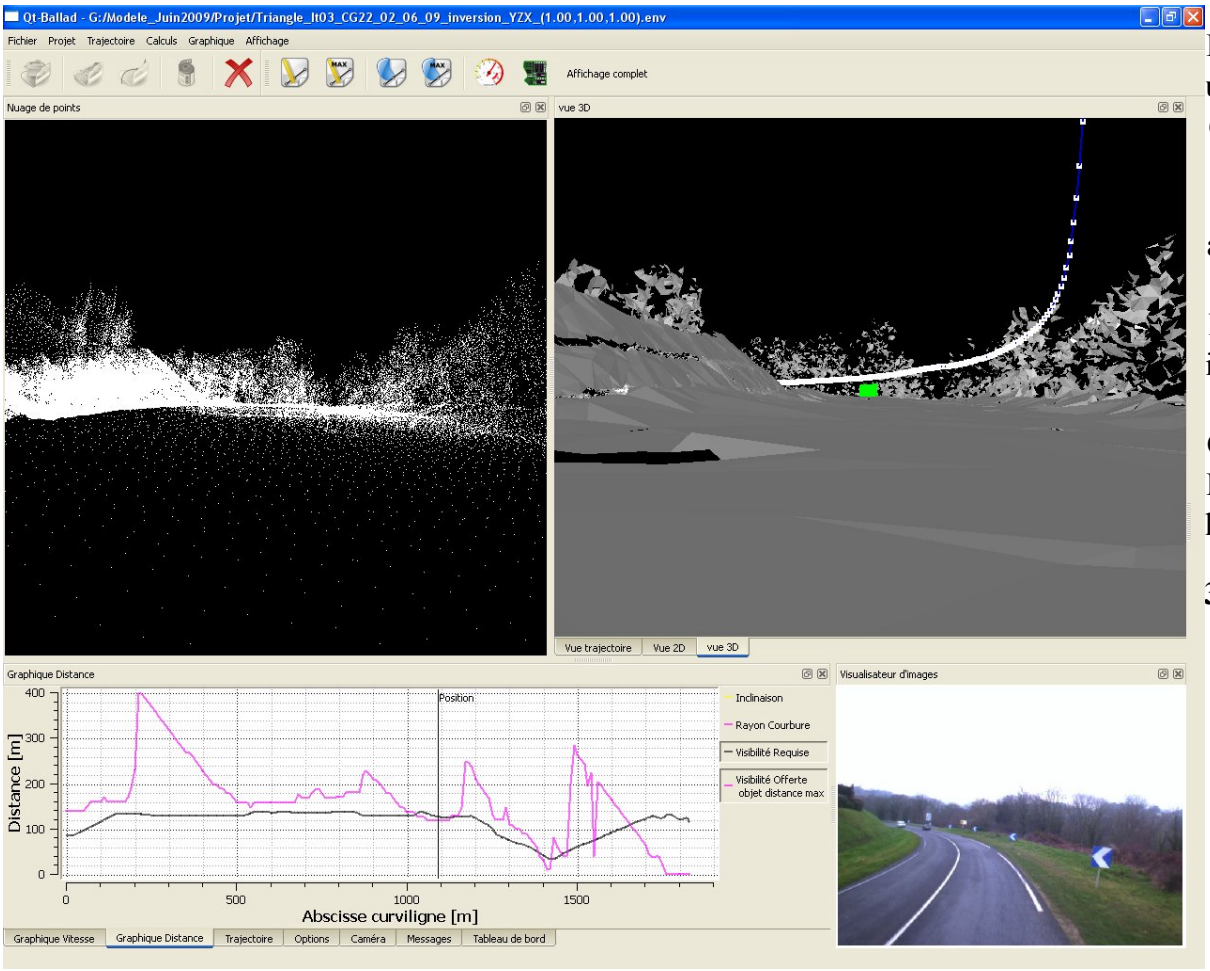


Figure 6 – Interface du logiciel Qt-Ballad.

3.3 Discussion

Dans le cadre du projet SARI-VIZIR du PREDIT, différents types d'itinéraires ont été sélectionnés pour effectuer une étude comparative, détaillée dans (Tarel et al., 2009). Trois approches ont été testées: en utilisant la stéréovision, en utilisant un modèle en 3D et à l'aide d'un système de véhicule suiveur. Cette dernière méthode, appelée VISULINE voir (Kerdudo et al., 2008), est utilisé comme référence. Le système se compose de deux véhicules reliés par radio, qui restent à une distance fixe donnée. L'observateur, dans le second véhicule, vérifie visuellement si le premier véhicule est visible ou non. Pour estimer la distance de visibilité maximale, ce protocole doit être répété pour plusieurs intervalles: 50, 65, 85, 105, 130, 160, 200, 250 et 280 mètres. Le résultat est montré sur la route RD768 (CG22), section de 2 kms, sous la forme d'une courbe verte discontinue (Figure 7). Sur la même figure, la distance de visibilité requise, calculée à partir des caractéristiques de la route apparaît en trait continu rouge. Les estimations de la visibilité disponible obtenues par stéréovision sont affichées sous la forme d'une courbe bleue avec des croix, et la courbe en noir avec des étoiles représente les résultats de l'approche basée sur la modélisation 3D.

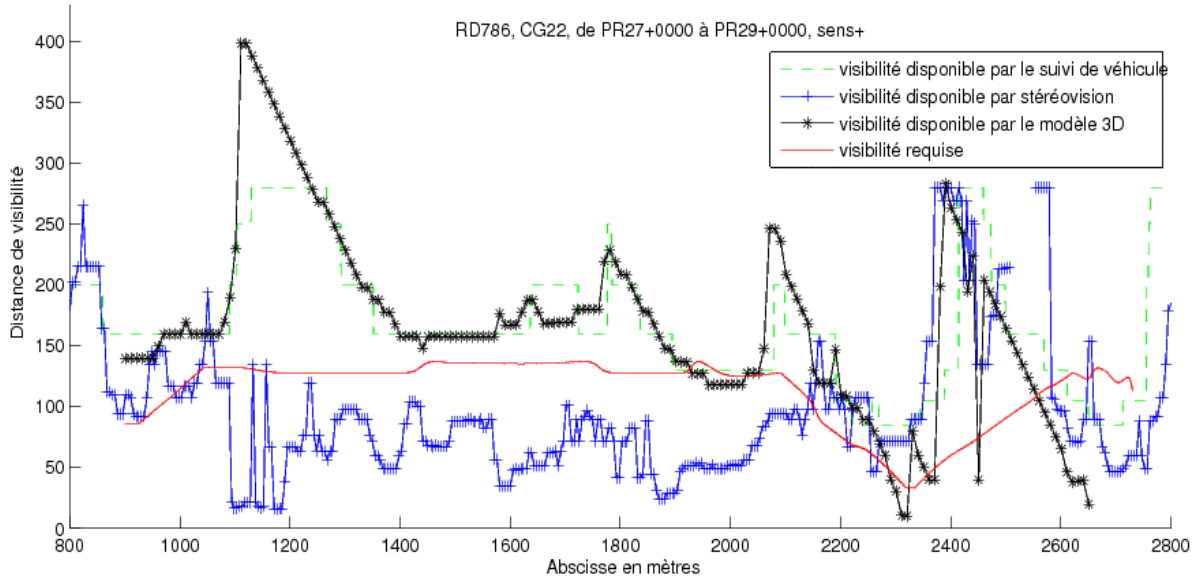


Figure 7 – Comparaison expérimentale des estimations obtenues par les trois approches.

Les résultats montrent que l'approche par stéréovision sous-estime la distance de visibilité sur la majeure partie de la section. Un examen attentif des résultats permet de constater que l'algorithme est très sensible à la présence de véhicules sur la route. En outre, la classification « route » - « non route » des parties lointaines de l'image devient plus difficile lorsque les couleurs sont fades, ce qui se produit dans certaines conditions météorologiques ou pendant l'hiver. Les résultats de la méthode fondée sur le modèle 3D sont en bon accord avec ceux de la méthode de référence. Toutefois, nous rappelons que le système à deux véhicules nécessite plusieurs passages afin d'obtenir ce résultat. En outre, elle est limitée à 280 m, tandis que la distance disponible maximale semble atteindre 400 m environ à l'abscisse 1150 mètres.

En conclusion, cette expérience a montré que, dès lors qu'un modèle 3D précis de la route et de ses environs est disponible, des algorithmes de visualisation bien connus tels que le lancer de rayon ou le *z-buffering* peuvent être mis en œuvre pour estimer la distance de visibilité disponible. Toutefois, l'obtention de tels modèles nécessite des technologies coûteuses et des précautions doivent être prises au cours du traitement du nuage de points. En particulier, le modèle triangulé doit être suffisamment simplifié pour permettre le traitement en vraie grandeur d'itinéraires routiers, sans toutefois y perdre trop d'information utile. D'autre part, la méthode basée sur le traitement de l'image par stéréovision tend à sous-estimer la distance de visibilité en raison des difficultés inhérentes à la tâche de segmentation lointaine de la chaussée. Toutefois, la stéréovision est bon marché et peut s'avérer très précise en champ proche. Nous pensons donc qu'elle pourrait constituer une alternative intéressante aux capteurs LIDAR et nous avons l'intention d'étudier cela dans un avenir proche.

Remerciements

Les auteurs sont reconnaissants au projet SARI-VIZIR du PREDIT pour le financement de ces recherches. Les données VISULINE ont été fournies par le LRPC de St-Brieuc (ERA 33 LCPC).

Références

- Bernardini F., Mittleman J., Rushmeier H. et Silva C. (1999), "The Ball Pivoting Algorithm for surface reconstruction", IEEE Trans. On Visual and Computer Graphics, vol. 5, no. 4, pp. 349-359.
- Bigorgne E., Charbonnier P. & Tarel J.-P. (2008), « Méthodes de mesure de la visibilité géométrique », projet SARI-VIZIR du PREDIT, action 1.2 – Livrable n° 1.2.4.
- Goulette F., Nashashibi F., Abuhadrous I., Ammoun S. & Laurgeau C. (2006), "An Integrated On-Board Laser Range Sensing System for On-The-Way City and Road Modelling", Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol 34, Part A.
- Kerdudo K., Le Mestre V., Charbonnier P., Tarel J.P. & Le Potier G., « La visibilité géométrique : quels outils de diagnostic ? », Revue Générale des Routes et Autoroutes, n°865, mars 2008.
- SETRA (1994), « ARP : Aménagement de Routes Principales (sauf les autoroutes et routes express à deux chaussées) », 08/1994. Chapitre 4 and Annexes 3.
- SETRA (2000), « ICTAAL : Instruction sur les Conditions Techniques d'Aménagement des Autoroutes de Liaison », circulaire du 12/12/2000.
- Tarel J.-P. & Bigorgne E. (2009), "Long-Range Road Detection for Off-line Scene Analysis", Actes IEEE Intelligent Vehicle Symposium (IV'09), Chine, pp. 15-20.
- Tarel J.-P., Charbonnier P., Désiré L., Bill D. & Goulette F. (2009), « Evaluation comparative des méthodes de mesure de la distance de visibilité géométrique », projet SARI-VIZIR du PREDIT, action 3.1 – Livrable n° 3.1.2.
- Tarel J.-P., Ieng S.-S. & Charbonnier P. (2007), "Accurate and Robust Image Alignment for Road Profile Reconstruction", Actes International Conference on Image Processing (ICIP'07), USA, pp. 365-368.

DETECTION DE CONDITIONS DE VISIBILITE REDUITE PAR CAMERA BORD DE VOIES

Nicolas HAUTIERE
LEPSIS
INRETS-LCPC
Paris, France

Jérémie BOSSU
LEMCO, INRETS
Versailles, France

Erwan BIGORGNE
Majority-report
Paris, France

Didier AUBERT
LIVIC
INRETS-LCPC
Versailles, France

Résumé

Dans le cadre du projet Européen SAFESPOT, nous avons conçu un système bord de voies qui vise à détecter des situations critiques telles que le brouillard dense ou les fortes chutes de pluie à l'aide d'une simple caméra de vidéosurveillance. Ce système est installé dans l'unité bord de voies spécifiée par SAFESPOT et dont l'architecture fonctionnelle est rappelée. Les différents traitements d'image sont présentés, en particulier la détection de brouillard, l'estimation de la distance de visibilité ainsi que la détection de pluie. En se fondant sur les principes théoriques de ces algorithmes, une caméra est ensuite spécifiée pour répondre aux besoins exprimés par la norme NF P 99-320 sur la météorologie routière en matière de visibilité. Des résultats expérimentaux sont présentés ainsi que des perspectives de validation à plus grande échelle.

Mots-clés: système coopératifs, classe de visibilité, brouillard, pluie, vidéosurveillance, équipement bord de voies.

Abstract

In the framework of the SAFESPOT European project, we have designed a roadside system which aims at detecting critical environmental conditions such as dense fog and strong rain showers thanks to a video surveillance camera. The proposed system is located in the SAFESPOT roadside unit whose functional architecture is recalled. The different image processing algorithms are presented, in particular fog detection, estimation of the visibility distance, as well as rain detection. Based on the theoretical principles of these algorithms, a camera is specified to answer the requirements of the French standard NF P 99-320 on highway meteorology in terms of visibility. Experimental results are shown as well as perspectives of validation at a higher scale.

Keywords: cooperative systems, visibility range, fog detection, rain detection, video surveillance, road-side equipment.

1. Introduction

En combinant les données issues de capteurs placés dans les véhicules avec celles issues de capteurs placés en bord de voies, le projet Européen SAFESPOT cherche à prévenir plus en avance l'occurrence d'accidents par l'utilisation des communications véhicule à véhicule et véhicule infrastructure (Brignolo et al., 2006). L'alerte du conducteur et l'adaptation de la vitesse préconisée dans le véhicule en présence de conditions météorologiques dégradées détectées par l'infrastructure font partie des scénarios testés par le projet. Dans ce contexte, nous avons spécifié, développé et testé un capteur bord de voies fondé sur une simple caméra noir et blanc visant à détecter des conditions réduites de visibilité météorologiques. Cette solution à bas coût est à même de s'interfacer avec la plate-forme bord de voie spécifiée par SAFESPOT. Elle répond également aux besoins exprimés par la norme NF P 99-320 sur la météorologie routière en matière de visibilité. Dans ce papier, nous présentons les principales fonctions du système ainsi que les performances obtenues et les références bibliographiques permettant au lecteur intéressé de mieux appréhender le détail des algorithmes.

2. La plate-forme bord de voies SAFESPOT

Les principales fonctions de l'unité de bord de voies SAFESPOT sont l'acquisition, le traitement et le stockage de données. Les sources de données sont d'origine multiple. Les plus importantes sont les capteurs bords de voies mais aussi les véhicules SAFESPOT. Pour améliorer la qualité des données issues de ces différentes sources, l'unité de bord de voies effectue trois niveaux de traitement. Le « Data receiver » transforme les données brutes en information utiles pour la fusion de données. L'« Object Refinement » fusionne les données de différentes sources pour améliorer la confiance sur la détection d'objets mobiles, étendre la connaissance associée à ces objets et les localiser par l'emploi d'algorithmes de map-matching. Le « Situation Refinement » est quant à lui responsable de la fusion concernant des évènements tels qu'une congestion, des conditions météos dégradées... Le tout est stocké dans une carte locale dynamique (LDM) qui a vocation à être interrogée par les applications. Une vue d'ensemble de la plate-forme est proposée en figure 1.

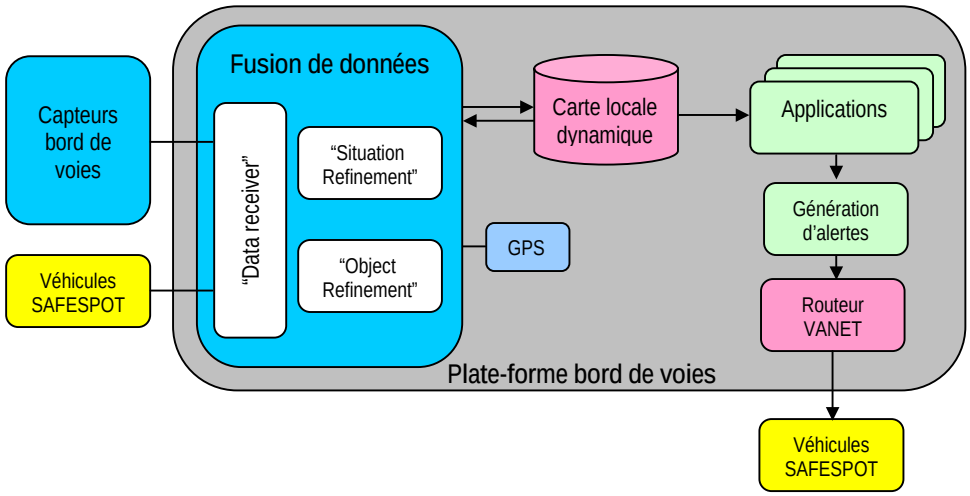


Figure 1 - Vue d'ensemble de la plate-forme bord de voies spécifiée par SAFESPOT.

3. Besoins et requis en termes de mesure de la visibilité

D'après l'architecture cadre européenne des ITS (EITSFA), un système ITS doit être capable d'améliorer la vision du conducteur par conditions météorologiques dégradées (par exemple par temps de brouillard), d'estimer la classe de visibilité et de détecter l'origine de la réduction de visibilité causée par les conditions météorologiques ou la pollution. La norme NF P 99-320 sur la météorologie routière est plus précise. D'après celle-ci, le capteur idéal de visibilité routière doit détecter des visibilités inférieures à 400 m, l'assigner dans l'une des catégories du Tableau 1 et déterminer l'origine de la réduction de visibilité (brouillard, pluie, grêle, neige). Nous nous sommes appuyés sur cette norme pour nos développements.

Tableau 1– Classes de visibilité issues de la norme française NF P 99-320.

Classe de visibilité	Distance de visibilité [m]
1	200 à 400
2	100 à 200
3	50 à 100
4	< 50

4. Un capteur météorologique fondé sur une caméra

4.1 Analyse coût-bénéfice

Aujourd'hui, les capteurs de brouillard et de pluie sont des capteurs dédiés et restent coûteux. En outre, les capteurs de brouillard existants ont des problèmes de fiabilité en cas de brouillard dense ou inhomogène (Hautière et al, 2006b). En comparaison, un logiciel de traitement d'images peut être facilement ajouté à un système existant de vidéo surveillance du trafic routier. De cette façon, le gestionnaire routier n'a pas de matériel supplémentaire à installer sur le bord de la route. Dans le cas d'une installation nouvelle, notre travail permet de multiplier les fonctionnalités supportées par les caméras et donc d'en réduire les coûts puisque les bénéfices sont supérieurs.

4.2 Principe de fonctionnement

Communément, les systèmes de vidéosurveillance du trafic se fondent sur des méthodes de modélisation du fond de la scène, où chaque image est comparée à une référence ou un modèle de fond pour identifier les objets en mouvement. A cause des changements d'illumination ou des changements à « long terme » dans la scène, il est nécessaire d'estimer constamment ce modèle de fond. Généralement, les constantes de temps sont choisies à une valeur proche du temps que nécessite un objet mobile pour traverser la scène. Les conditions météorologiques ont des dynamiques temporelles différentes. Le brouillard est généralement considéré comme un phénomène relativement stable, alors que la pluie ou la neige sont des phénomènes à la dynamique plus élevée. Sur la base de ces considérations, le modèle de fond (BG) peut être utilisé pour détecter et estimer la densité de brouillard alors que le premier plan peut être utilisé pour détecter la présence de pluie ou de neige. Ce principe est schématisé sur la figure 2.

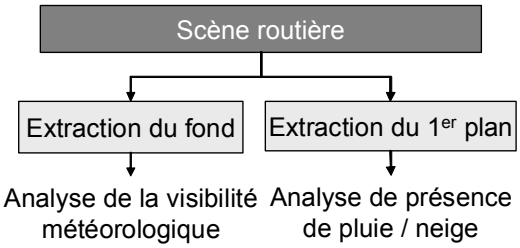


Figure 2 – Principe retenu pour l'estimation des conditions météorologiques.

Pour calculer l'image de fond, nous avons utilisé l'approche MoG (Stauffer et Grimson, 2000). Dans celle-ci, chaque pixel est modélisé par une mixture de *K* distributions Gaussiennes. La probabilité qu'un pixel possède la valeur X_t à l'instant *t* s'écrit :

$$P(X_t) = \sum_{k=1}^{K} \omega_k \eta(X_t; \mu_{k,t}) \quad (1)$$

où ω_k est le poids de la $K^{\text{ième}}$ Gaussienne. $\eta(X; \mu_k)$ est la $K^{\text{ième}}$ composante de la distribution qui s'écrit:

$$\eta(X; \mu_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \mid \Sigma_k \mid}} e^{-\frac{1}{2}\Sigma_k^{-1}(X-\mu_k)^2} \quad (2)$$

où μ_k est la moyenne et $\Sigma_k = \sigma_k^2$ est la variance de la $K^{\text{ième}}$ composante. Les *K* composantes sont ordonnées selon leur finesse ω_k / σ_k et les *B* premières sont utilisées pour modéliser le fond. *B* est estimé selon :

$$B = \arg\min_b \left(\sum_{j=1}^{b} \omega_j > T \right) \quad (3)$$

Le seuil *T* est la fraction minimale du modèle de fond. En d'autres termes c'est la probabilité minimale a priori d'observer un pixel de fond. Le schéma de mise à jour du jour du modèle est détaillé dans (Hautière et al, 2008a). Ensuite, la détermination des objets de premier plan est réalisée en marquant tous les pixels éloignés de plus de *D* fois l'écart-type de n'importe laquelle des *B* distributions.

Le Tableau 2 liste les fonctionnalités du logiciel de traitement d'images développé dans le cadre du projet SAFESPOT sur ce principe de séparation fond et premier plan :

Tableau 2 - Vue d'ensemble des fonctionnalités du logiciel développé

Fonctionnalité	Gamme de fonctionnement
Présence de brouillard	Jour et nuit
Intensité du brouillard	Jour
Classe de visibilité	Jour et nuit
Présence de pluie	Jour

Dans ce qui suit, nous détaillons deux d'entre eux, à savoir la détection et l'estimation de la distance de visibilité, ainsi que la détection de la présence de pluie. Pour les autres algorithmes de détection, le lecteur intéressé peut se référer à (Hautière et al., 2008b).

4.3 Détection et estimation de la densité de brouillard diurne

Concernant la situation de brouillard diurne, nous avons proposé un logiciel de traitement d'images ne nécessitant pas de référence par beau temps qui non seulement estime la classe de

visibilité mais aussi détecte que la réduction de visibilité est causée par le brouillard. Contrairement aux approches existantes, nous prenons en compte la structure 3D de la scène en détectant dynamiquement l'espace roulable et filtrons les objets mobiles dans la région d'intérêt. Un exemple de réalisation est présenté sur la figure 3.

Principe

En supposant que la route est localement plane, la distance d'un point à la distance *d* sur la route peut s'exprimer par :

$$d = \frac{\lambda}{(v - v_h)} \tag{4}$$

où v désigne le numéro de ligne image, $\lambda = H\alpha / \cos^2(\theta)$ et $v_h = v_0 - \alpha \tan(\theta)$. v_0 désigne la demi-hauteur de l'image. θ désigne l'angle de tangage de la caméra. v_h représente la position verticale de la ligne d'horizon dans l'image. Les paramètres intrinsèques de la caméra sont sa longueur focale f et la taille de ses pixels t_p. La notation $\alpha = f / t_p$ est également utilisée. Enfin, H désigne la hauteur de montage de la caméra. Dans une image de brouillard, l'intensité I d'un pixel est le résultat de la fonction de réponse f_c de la caméra appliquée à la luminance L de la scène donnée par la loi de Koschmieder. En supposant f_c linéaire, on obtient :

$$I = f_c(L) = Re^{-\beta d} + A_\infty(1 - e^{-\beta d}) \tag{5}$$

où β désigne le coefficient d'extinction de l'atmosphère, R l'intensité intrinsèque du pixel correspondant et A_∞ l'intensité du ciel à l'horizon.

Une première approche consiste à estimer directement la valeur de β. Pour cela, après un changement de v en d, on calcule la dérivée seconde de I par rapport à v et on résout l'équation :

$$\frac{\partial^2 I}{\partial v^2} = 0 \Leftrightarrow \beta = \frac{2(v_i - v_h)}{\lambda} \tag{6}$$

où v_i désigne la position du point d'inflexion de $I(v)$. On en déduit la distance de visibilité météorologique par $V_{met} = 3/\beta$.

La loi de Koschmieder permet également de démontrer que le contraste des objets par rapport au ciel présents dans l'environnement est diminué selon :

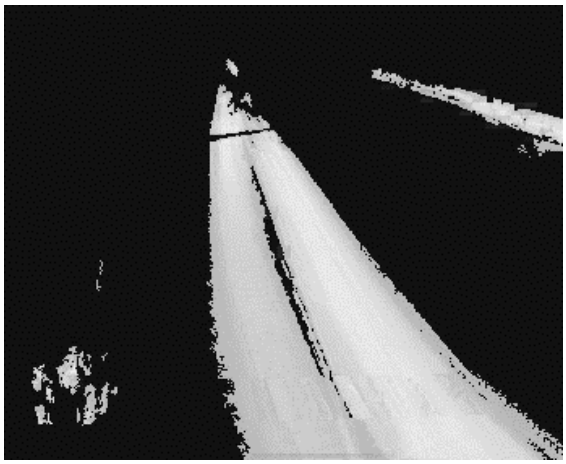
$$C = C_0 e^{-\beta d} \tag{7}$$

où C_0 est le contraste intrinsèque de l'objet par rapport au ciel. Une deuxième approche consiste donc à estimer directement la distance à l'objet appartenant à la surface de la route le plus éloigné et possédant un contraste supérieur à 5 %. De même, la route est supposée localement plane. C'est la distance de visibilité mobilisée.

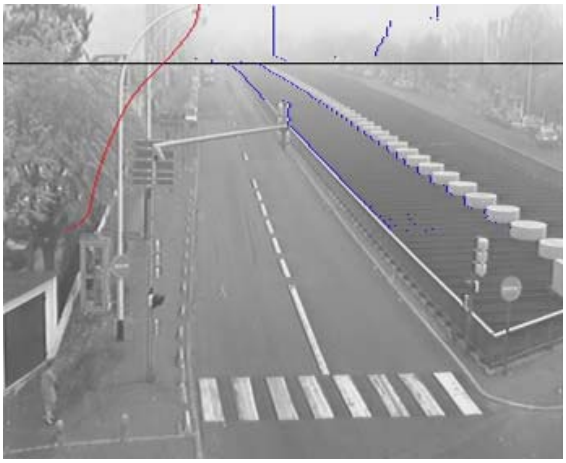
Mise en œuvre

Pour être mises en œuvre, les principes présentés précédemment sont appliqués à l'image de fond restreinte à la région d'intérêt constituée de l'espace roulable. Ce dernier est déterminé automatiquement en accumulant dans le temps les emplacements des objets mobiles issus de l'image de premier plan. De cette façon, on peut supposer que les pixels présents appartiennent bien au plan de la route. Pour implanter les deux approches, les principes sont ceux respectivement décrits dans (Hautière et al., 2006a) et (Hautière et al, 2006b).

(a) Carrefour urbain par temps de brouillard



(b) Espace roulable déterminé par l'accumulation temporelle des emplacements des objets mobiles.



(c) Détection du brouillard diurne et estimation de la distance de visibilité météorologique (ligne noire).

(d) estimation de la distance de visibilité mobilisée (ligne bleue).

Figure 3 - Détection et caractérisation du brouillard diurne par la caméra bord de voies.

4.4 Détection de la présence de pluie

Principe

Pour la détection de pluie, une fois la caméra réglée pour voir la pluie, les composantes de pluie, dont l'orientation est supposée majoritairement quasi-verticale, sont extraites par la soustraction d'image de fond. Nous construisons ensuite un histogramme d'orientation de ces composantes de pluie et cherchons la présence d'un éventuel pic stable temporellement (Bossu et al., 2009). Un exemple de réalisation est présenté sur la figure 4. Le détail de l'algorithmeest présenté ci-après.

Segmentation

Sur l'image de premier plan, deux traitements complémentaires sont appliqués successivement. Le premier consiste à sélectionner les pixels plus clairs que le fond, comme proposé par Garg et Nayar (2007). Le deuxième, à l'aide d'un algorithme d'étiquetage en composantes connexes, élimine les objets ayant une taille trop importante pour correspondre à une goutte de pluie.

Modélisation

Pour chaque région i conservée de l'image de premier plan, nous calculons, en utilisant les moments géométriques d'ordre 0, 1 et 2, son orientation μ_i à laquelle nous associons un poids w_i

et une incertitude $d\mu_i$ liés à ses dimensions. Un histogramme d'orientation $h(\theta)$ avec $\theta \in [0;\pi]$ est alors calculé sur l'ensemble des éléments restant de l'image de premier plan par une technique de type Parzen :

$$h(\theta) = \sum_{i=0}^{M} w_i \frac{1}{d\mu_i \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\theta-\mu_i}{d\mu_i}\right)^2} \quad (8)$$

avec M le nombre de régions dans l'image. Il arrive souvent que l'image des objets en mouvements soit un mélange de segments de pluie et de bruit. La distribution de l'orientation des segments de pluie, par hypothèse, suit une loi normale alors que la distribution d'orientation du bruit suit une loi uniforme. Un modèle pour représenter l'histogramme h obtenu est donc la mixture d'une loi normale et uniforme comme suit :

$$y_i = \Pi \mathrm{N}(\theta_i \mid \mu, \sigma) + (1-\Pi) U_{[a,b]}(\theta_i) \quad (9)$$

avec $i = 1,\ldots,n$. n est le nombre de classe θ_i . Π correspond à la surface de la loi normale si nous considérons que la surface de la distribution totale est égale à 1.

Estimation

Afin d'évaluer les paramètres de ces deux lois, nous utilisons un algorithme EM (Maximisation de l'Espérance). Cet algorithme est itératif, la $k^{\text{ième}}$ étape d'espérance est donnée par :

$$\hat{z}_i^k = \frac{(1-\hat{\Pi}^{k-1}) U_{[\hat{a},\hat{b}]}(\theta_i)}{\hat{\Pi}^{k-1} \mathrm{N}(\theta_i \mid \hat{\mu}^{k-1}, \hat{\sigma}^{k-1}) + (1-\hat{\Pi}^{k-1}) U_{[\hat{a},\hat{b}]}(\theta_i)} \quad \text{avec } i = 1,\ldots,n \quad (10)$$

La $k^{\text{ième}}$ étape de maximisation est donnée par :

$$\hat{\Pi}^k = \sum_{i=1}^{N} (1-\hat{z}_i^k) y_i \Big/ \sum_{i=1}^{N} y_i \quad (11)$$

$$\hat{\mu}^k = \sum_{i=1}^{N} (1-\hat{z}_i^k) \theta_i y_i \Big/ \sum_{i=1}^{N} (1-\hat{z}_i^k) y_i$$

$$(\hat{\sigma}^k)^2 = \sum_{i=1}^{N} (1-\hat{z}_i^k)(\theta_i - \hat{\mu}^k)^2 y_i \Big/ \sum_{i=1}^{N} (1-\hat{z}_i^k) y_i$$

Pour initialiser l'algorithme, $\hat{\mu}^0$, $\hat{\sigma}^0$, $\hat{\Pi}^0$, $\hat{a}$ et $\hat{b}$ doivent être approximés. Les trois premiers le sont en calculant la valeur de la médiane horizontale de l'histogramme que l'on soustrait à chaque échantillon pour ne garder qu'une partie de la loi normale. Les derniers paramètres sont donnés par :

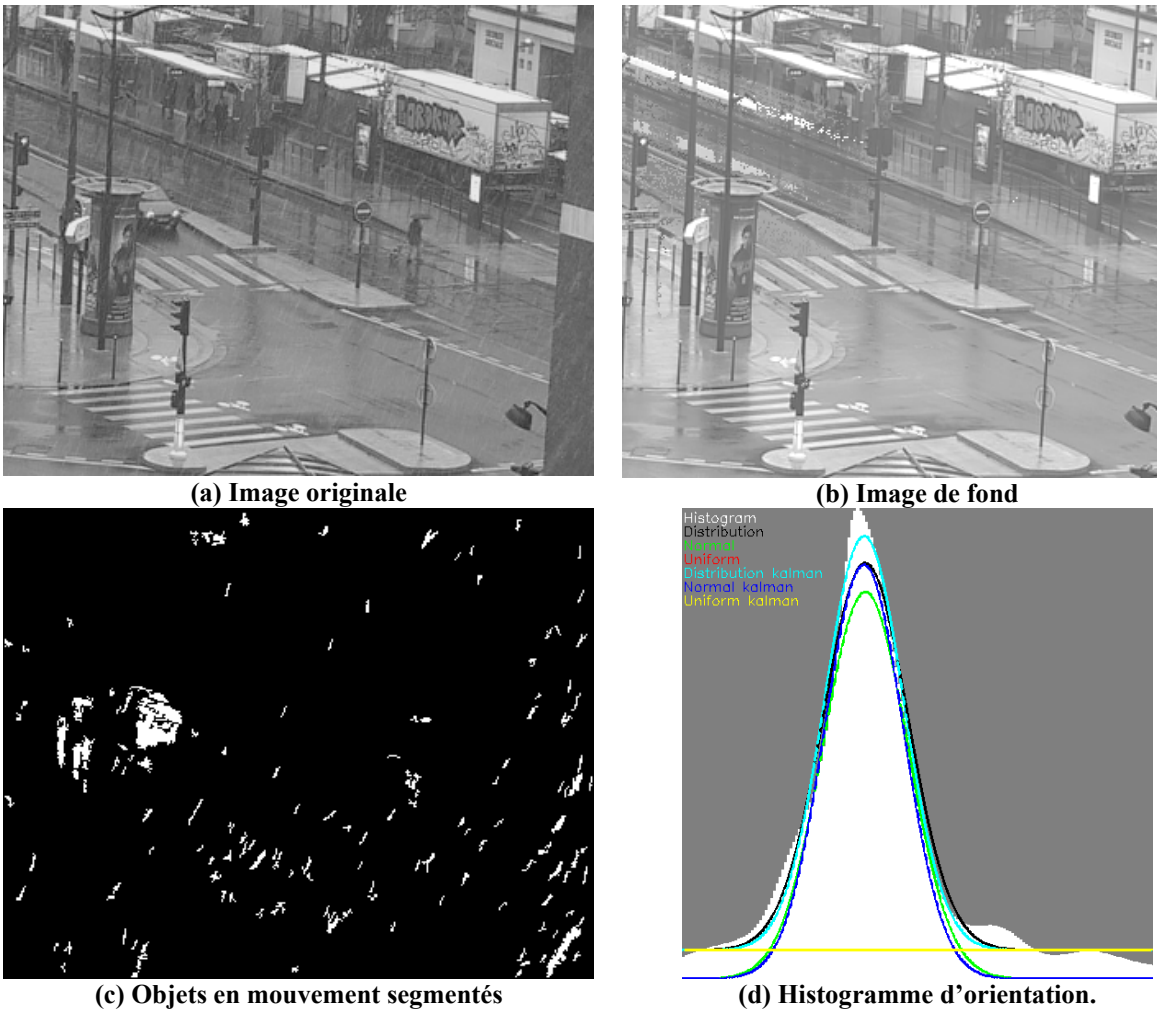
$$\hat{a} = \theta_0$$
$$\hat{b} = \theta_N \quad (12)$$

et ne changent pas durant l'exécution de l'algorithme. Finalement, après convergence de l'algorithme EM, on vérifie si la distribution estimée obtenue est en accord avec la distribution observée à l'aide d'un test d'adéquation. Si c'est le cas, l'image est conservée pour la suite du traitement qui examine la cohérence temporelle du modèle.

Suivi et décision

Un filtre de Kalman permet de lisser la distribution dans le temps et de la comparer au modèle courant. En effet, il y a très peu de chance pour que l'orientation de la pluie et son écart-type

varient beaucoup d'une image à une autre. Cela implique que la distribution lissée doit être proche de la distribution observée. Un deuxième test d'adéquation est donc réalisé entre la distribution lissée et celle observée. Finalement, si le taux de double test d'adéquation réussis est supérieur à 50 % sur un horizon temporel court, on suppose la présence de pluie.



(a) Image originale **(b) Image de fond**

(c) Objets en mouvement segmentés **(d) Histogramme d'orientation.**

Figure 4 - Détection de la pluie par la caméra bord de voies.

4.5 Résultats expérimentaux

Sur les séquences vidéo testées (2h avec et sans brouillard), l'algorithme de détection du brouillard diurne est d'une grande précision (100 %) au sens de la classification binaire. L'estimation de la distance de visibilité est réalisée avec une erreur inférieure à 10 % sur une série d'images (environ 50) acquises en statique avec une caméra embarquée par différentes conditions de visibilité. L'algorithme de détection de pluie a une précision de 95 % (10 minutes avec ou sans pluie) également au sens de la classification binaire. Le réglage optique de la caméra pour voir les gouttes de pluie reste cependant problématique. Pour le moment, seule les fortes averses, les chutes de grêle et de neige sont reconnues. En outre, par manque de données de vérité terrain, nous ne sommes pas capables de corréler l'intensité de la pluie avec la confiance sur les résultats de détection. La prochaine étape est donc la validation systématique des approches grâce à des sites pilotes équipés de caméras de vidéosurveillance et de capteurs météoroutiers de référence. C'est le cas des autoroutes Californiennes en proie à de fréquents épisodes de brouillard dense.

4.6 Spécifications de la caméra

A partir d'une étude de sensibilité des algorithmes de détection, nous avons proposé une méthodologie pour spécifier la caméra adaptée pour satisfaire les requis du Tableau 1. Tout d'abord, il faut que l'erreur due à la taille du pixel soit inférieure à 10 % pour la distance maximale de visibilité $d_{\max}$ que l'on souhaite considérer. Il faut également que la ligne d'horizon soit dans l'image et que le point d'inflexion v_i soit dans la moitié supérieure de l'image pour la distance minimale de visibilité $d_{\min}$ que l'on souhaite considérer. Ces différentes contraintes sont résumées dans le système d'équations suivant :

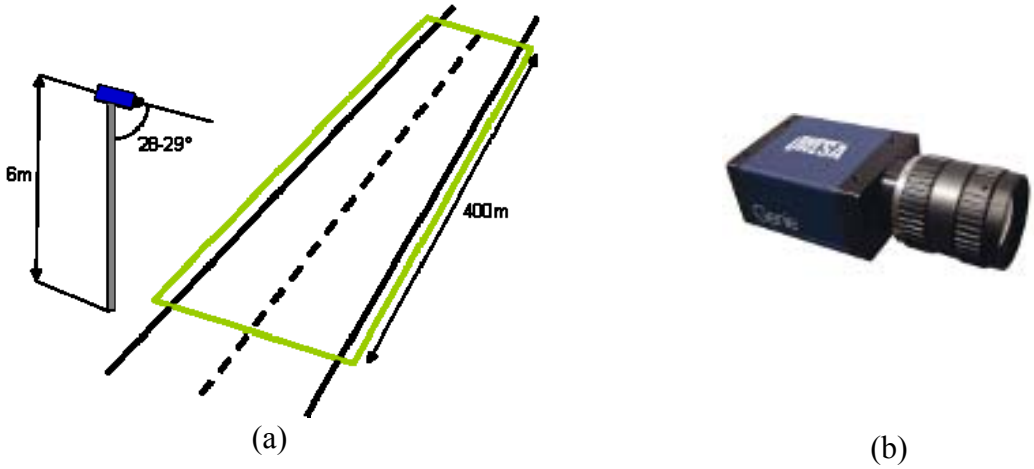
$$\begin{cases} \dfrac{\lambda}{\left\lfloor v_h + {}^{\lambda}\!/_{d_{\max}} \right\rfloor - v_h} - \dfrac{\lambda}{\left\lceil v_h + {}^{\lambda}\!/_{d_{\max}} \right\rceil - v_h} < 0{,}1 \times d_{\max} \\ \sin^{-1}\left({}^{H}\!/_{3d_{\min}}\right) < \theta < \tan^{-1}\left({}^{v_0}\!/_{\alpha}\right) \end{cases} \quad (13)$$

Les paramètres de l'équation sont détaillés en section 4.3. Pour $d_{\min} = 50m$ et $d_{\max} = 400m$, les différentes solutions techniques que nous avons trouvées sont détaillées dans le Tableau 3 :

Tableau 3 - Solutions techniques trouvées pour satisfaire les requis du Tableau 1.

Matrice [pouce]	1/3	2/3	1/2
Hauteur [m]	5-6	5-6	6
Longueur focale [mm]	4,2	4,8	4,5
Taille du pixel [µm]	4,65	6,45	4,65
Résolution horizontale [pixel]	1040	1024	1360
Angle d'inclinaison [degré]	31-38	29-64	28-29

Nous avons choisi la troisième solution, i.e. la camera DALSA GENIE-M 1400 (Figure 5b). La configuration optimale de cette camera est schématisée sur la Figure 5a. Puisque cette caméra est dépourvue d'objectif auto-iris, nous avons conçu un algorithme pour choisir le temps d'exposition de façon à optimiser l'acquisition des images (Hautière et al., 2009). Cette réalisation a été grandement facilitée par le standard GigE qui autorise la reconfiguration dynamique de la caméra.



(a) (b)

Figure 5 - (a) configuration de référence de la camera spécifiée ; (b) caméra acquise.

5. Conclusion et perspectives

Dans le cadre du projet Européen SAFESPOT, nous avons conçu un système bord de voies qui vise à détecter des situations critiques telles que le brouillard dense ou les fortes chutes de pluie à l'aide d'une simple caméra de vidéosurveillance. Ce système est installé dans l'unité bord de voies spécifiée par SAFESPOT et dont l'architecture fonctionnelle est rappelée. Les différents traitements d'image présentés se fondent sur une séparation du premier plan et de l'arrière plan par une mixture de Gaussiennes. L'arrière plan est utilisé pour analyser la visibilité et le premier plan pour analyser la pluie. La détection de brouillard et l'estimation de la distance de visibilité se fondent sur la loi de Koschmieder. La détection de pluie se fonde sur un modèle probabiliste de l'orientation de la pluie. Sur la base du principe théorique de ces algorithmes, une caméra a été spécifiée pour répondre aux besoins exprimés par la norme NF P 99-320 sur la météorologie routière en matière de visibilité. Sa résolution est deux fois supérieure à celle qui équipe communément les réseaux routiers ce qui en fait une solution acceptable dans un proche avenir. Des résultats expérimentaux sont présentés qui montrent des résultats très encourageants mais statistiquement insuffisants. Nous envisageons des campagnes de validation à plus grande échelle en partenariat avec Météo France ou encore avec l'Université de Berkeley en Californie (USA).

Remerciements

Ce travail a été en partie financé par le projet intégré Européen du 6ème PCRD SAFESPOT (IST-4-026963-IP).

Références

- Bossu, J., Hautière, N. et Tarel, J.-P. (2009), « Utilisation d'un modèle probabiliste d'orientation de segments pour détecter des hydrométéores dans des séquences vidéo », Actes du XXIIe Colloque GRETSI, Dijon, France.
- Brignolo, R., Andreone, L. and Burzio, G. (2006), "The SAFESPOT Integrated Project: Co-operative systems for road safety", in Proc. Transport Research Arena, Göteborg, Sweden.
- Garg, K. and Nayar, S. (2007), "Vision and rain", International Journal of Computer Vision, 75, 1, 3–27.
- Hautière, N., Bigorgne, E. and Aubert, D. (2008a), "Daytime visibility range monitoring through use of a roadside camera", in Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Eindhoven, The Netherlands.
- Hautière, N., Bigorgne, E., Bossu, J. and Aubert, D. (2008b), "Meteorological conditions processing for vision-based traffic monitoring", in Proc. International Workshop on Visual Surveillance, European Conference on Computer Vision, Marseille, France.
- Hautière, N., Bossu, J. et Brand, C. (2009), « Une solution d'acquisition d'images à multiples fonctions de réponse », dans Actes du XXIIe Colloque GRETSI, Dijon, France.
- Hautière, N., Tarel, J.-P., Lavenant, J. and Aubert, D. (2006a), "Automatic fog detection and estimation of visibility distance through use of an onboard camera", Machine Vision and Applications, 17, 1, 8–20
- Hautière, N., Labayrade, R. and Aubert, D. (2006b), "Estimation of the Visibility Distance by Stereovision: a Generic Approach", IEICE Transactions on Information and Systems, E89-D(7), 2084-2091.
- Stauffer, C. and Grimson, W. (2000), "Learning patterns of activity using real-time tracking", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22, 8, 747–757.

MISE EN ŒUVRE D'UNE PLATEFORME EXPERIMENTALE MOBILE DE RELEVE LASER POUR LE CALCUL DE DISTANCES DE VISIBILITE

Joël SENPAUROCA **J-E. DESCHAUD** **François GOULETTE**
Centre de Robotique – CAOR, Département Mathématiques et Systèmes, Mines ParisTech
Paris, France

Résumé
Cet article présente la mise en œuvre et l'amélioration d'une plateforme de cartographie mobile permettant de créer des modèles 3D routiers utilisés ensuite pour le calcul de distance de visibilité. La plateforme mobile, appelée LARA3D, est un véhicule prototype équipé de capteurs de positionnement (une centrale inertielle et un GPS), de capteurs télémétriques (scanners laser IBEO ou SICK) et de capteurs photogrammétriques (des caméras MARLIN et PIKE ou appareils photo CANON). Ce véhicule géo-localisé produit des nuages de points 3D de l'environnement traversé. Ces nuages de points sont traités pour construire des modèles 3D d'environnements. Dans le cadre des projets PREDIT VIZIR et DIVAS, les laboratoires CAOR (Mines ParisTech) et ERA « Méthodes Optiques » du LRPC de Strasbourg ont développé et mis au point une méthode de calcul de visibilité géométrique des routes basée sur la modélisation 3D de la route. Plusieurs adaptations ont été faites sur la plateforme mobile, portant à la fois sur les aspects matériels (choix et position des capteurs, informatique embarquée) et sur les traitements, pour améliorer ces calculs de distance de visibilité.

Mots-clés: Cartographie, plateforme, laser, visibilité.

Abstract
This article presents the implementation and improvement of a mobile mapping platform for creating 3D models road then used to calculate the distance of visibility. The platform, called LARA3D is a prototype vehicle equipped with position sensors (Inertial Measurement Unit and GPS), a range sensor (scanner IBEO or SICK) and photogrammetric sensors (cameras MARLIN and PIKE or CANON). This vehicle geo-located produces clouds of 3D points through the environment. These clouds of points are processed to build 3D models of environments. Through the VIZIR and DIVAS PREDIT projects, the laboratories CAOR (Mines ParisTech) and ERA "Optical Methods" of LRPC Strasbourg have developed and improved a method of calculating geometric visibility of roads based on 3D modeling of the road. Several modifications have been made on the mobile platform, addressing both the physical aspects (choice and position sensors, embedded computing) and software, to improve these calculations of the distance of visibility.

Keywords: Mapping, system, laser, visibility.

1. Introduction

Les systèmes de cartographie mobile ont pour vocation l'acquisition en trois dimensions, à l'aide d'un véhicule terrestre, de l'espace urbain et rural. Chaque point acquis par le laser est repositionné dans le repère terrestre au moyen d'une fonction de localisation (ici la fusion des données issues d'un GPS et d'une centrale inertielle). La numérisation échantillonne les surfaces au moyen d'impacts laser produits par le(s) télémètre(s) ; la reconstruction des surfaces (route et façades d'immeubles), avec leurs texturations et leurs colorations, repose sur l'acquisition simultanée de l'image avec le nuage de points.

Les applications de ces numérisations sont très larges et vont du tourisme, à l'aménagement du territoire en passant par la gestion du patrimoine et la sécurité routière. Les besoins sont réels en termes de volume de données et les systèmes mobiles répondent à ce besoin car ce sont des solutions qui permettent des numérisations à grande échelle malgré une plus faible résolution que les systèmes de numérisation fixe. L'une des applications de notre plateforme est la modélisation d'environnement routier et plus particulièrement le calcul de distances de visibilité à partir des modèles 3D générés. La distance de visibilité géométrique est un élément important de facteur de risque, à destination de gestionnaires de routes ou d'usagers.

2. Moyens mis en œuvre pour le système de cartographie mobile

La numérisation en trois dimensions se décline aujourd'hui à diverses échelles (d'objets de quelques millimètres aux structures de plusieurs kilomètres); le système de cartographie mobile est particulier en ce sens que l'*outil* utilisé pour l'échantillonnage est, de plusieurs ordres de grandeur, plus petit que l'espace qu'il numérise et dans lequel il est immergé. L'espace lui-même est passif ; c'est le système qui est mobile dans cet espace afin d'en parcourir une certaine étendue. En conséquence ce système utilise la synergie de trois fonctions : la localisation, la numérisation et la texturation. Le Tableau montre les supports d'information et les instruments associés à ces trois fonctions.

Tableau 1 – Supports d'information et moyens pour la cartographie mobile

Fonction	**Support de l'information**	**Instrument**
Localisation	Champ magnétique terrestre	Boussole
	Vitesse	Codeur incrémental
	Ondes radio	GPS
	Gravitation et masse inertielle	Centrale inertielle
Numérisation 3D	Onde laser	Scanner
Texturation	Lumière visible	Caméra ou Appareil photo

Le véhicule est le support du référentiel des positions respectives des divers instruments ; ce sont donc des localisations relatives au véhicule. Le véhicule lui-même est localisé sur le repère terrestre au moyen de la fusion des données du GPS et de la centrale inertielle. La boussole permet de connaître l'orientation initiale de la trajectoire du véhicule. Ce véhicule ainsi instrumenté est nommé 'Plateforme Mobile d'Acquisition'.

3. Les plateformes mobiles d'acquisition

De nombreux laboratoires sont équipés de plateformes mobiles ; par exemple, pour n'en citer que deux seulement, Fruh et al. (2005) génèrent des modèles 3D texturés à partir d'une

camionnette équipée de scanners SICK et d'une caméra grand angle. Asai et al. (2004) ont aussi un véhicule équipé d'un scanner omnidirectionnel pour produire des modèles 3D d'environnements extérieurs. La cartographie mobile est aussi un secteur d'activité industrielle et commerciale en plein essor ; l'offre commerciale couvre un large spectre tant au niveau des matériels, du composant au système, qu'au niveau des services. La plateforme LARA3D se distingue des systèmes commerciaux, dont elle ne peut être concurrente, de par ses objectifs ; ce système est versatile et évolutif car, de façon récurrente, il faut l'adapter aux besoins spécifiques. Cela a été notamment le cas pour répondre aux objectifs des projets VIZIR et DIVAS pour le calcul des distances de visibilité.

4. La numérisation 3D

En numérisation 3D, on échantillonne spatialement les surfaces de l'espace urbain ou rural. Le scanner est l'instrument de base pour cette numérisation. Il s'agit d'un scanner 2D qui balaye circulairement en relevant pour chaque angle la distance du scanner à la cible ; cela correspond à des coordonnées polaires dans le plan de balayage du laser. Le mouvement 'curviligne' du véhicule confère la troisième dimension ; ainsi dans l'espace tridimensionnel, on obtient des coordonnées cylindriques des points d'impact du rayon laser. Les surfaces cibles du laser sont donc échantillonnées, de façon discrète, par les tirs laser déployés selon une hélice. L'image que l'on obtient avec la caméra frontale, de façon synchrone avec la télémétrie laser, est un auxiliaire précieux pour analyser les résultats obtenus pour le calcul des distances de visibilité.

4.1 Adaptation de la plateforme pour le calcul de distance de visibilité

Dans la perspective du calcul de distance de visibilité le scanner laser a été orienté de telle sorte qu'il échantillonne le plan de la route et ses bas-côtés. Cette numérisation aillant pour vocation l'acquisition de la géométrie de la route, il convient de s'assurer d'obtenir la meilleure précision possible sur les mesures de distances du scanner laser. Dans cette perspective la hauteur du scanner par rapport au plan de la route est critique vis-à-vis de la précision du relevé ; l'adaptation de la plateforme consiste, entre autre, à déterminer la hauteur qui minimise l'incertitude sur la mesure réalisée par le télémètre laser. La figure 1 modélise le problème dans le cas qui nous a occupé lors des acquisitions pour le calcul de la distance de visibilité. La route possède une largeur notée r et la voie, où circule le véhicule, est de largeur $v = r/2$; on suppose que le véhicule est centré sur sa voie. Le centre optique du laser est le point O ; pour un angle θ la distance mesurée est notée l ou L.

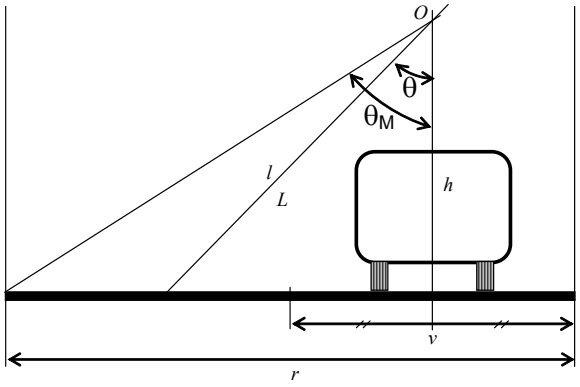


Figure 1 - Géométrie de la télémétrie laser pour l'estimation de l'incertitude de la mesure

Le scanner laser a ses caractéristiques intrinsèques, à savoir une incertitude sur la mesure de distance L notée $\frac{\Delta L}{L}$ et sur la connaissance de l'angle θ notée $\frac{\Delta\theta}{\theta}$. La géométrie de la scène affecte à son tour la mesure de distance l du scanner à la route. Le problème que l'on se pose est d'évaluer l'incidence de la hauteur du scanner sur l'incertitude de la mesure de la distance l dans cette scène (Ingensand 2006). Dans ce cas la relation entre l, h et θ s'écrit :

$$l = \frac{h}{\cos\theta} \qquad (1)$$

L'incertitude relative sur la mesure de distance est liée à celle de l'angle et s'écrit :

$$\frac{dl}{l} = \theta\, tg\theta \quad \frac{d\theta}{\theta} \qquad (2)$$

Dans cette démarche, on met en évidence les conséquences de l'incertitude de l'angle $\frac{\Delta\theta}{\theta}$ sur la mesure de la distance :

$$\frac{dl}{l} = \theta\, tg\theta \quad \frac{\Delta\theta}{\theta} \qquad (3)$$

Cette incertitude est donc proportionnelle à l'angle et à sa tangente que forme le rayon laser avec la verticale. Cette incertitude est maximale lorsque $\theta = \theta_M$, c'est-à-dire lorsque l'on vise l'extrémité de la voie de gauche (dans le sens du déplacement du véhicule) et s'écrit d'après l'équation (3) :

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{3}{4}\frac{r}{h}\, arctg\left(\frac{3}{4}\frac{r}{h}\right) \quad \frac{\Delta\theta}{\theta}$$
$$\frac{\Delta l}{l} = \alpha \quad \frac{\Delta\theta}{\theta} \qquad (4)$$

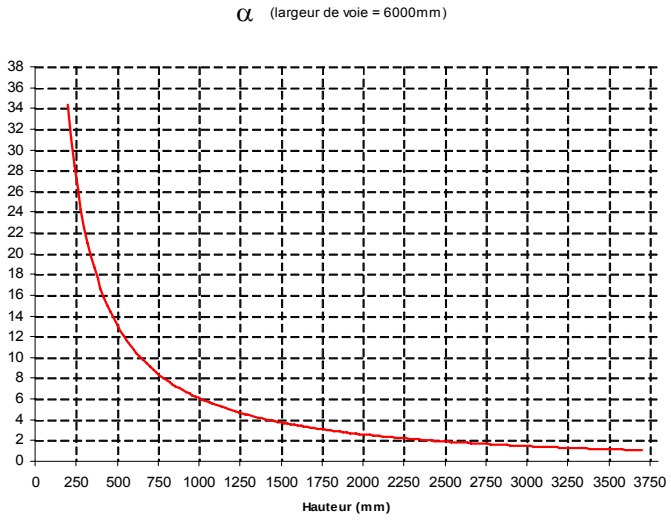


Figure 2 - Relation entre le coefficient α et la hauteur du scanner laser

Pour minimiser cette incertitude, il faut minimiser le coefficient α. Or le seul paramètre sur lequel on peut jouer est la hauteur h (qu'il faut donc rendre la plus grande possible). Cette hauteur, à laquelle on situe le centre du laser, va avoir un impact sur la géométrie globale du véhicule ; il s'agit alors de faire un compromis entre une hauteur totale de l'installation sur un véhicule devant circuler sur les routes et une performance attendue d'un tel système. De plus, sachant qu'il s'agit d'une évolution matérielle exigeante et devant être pérenne, on espère un facteur d'amélioration significatif mais pas quantifié très précisément. Pour une voie de 6 m

de large et la hauteur choisie de 2,7 m le coefficient $\alpha \approx 1{,}72$; à titre de comparaison, le scanner placé à 1 m de hauteur conduit à un coefficient $\alpha \approx 6{,}1$. Cette adaptation a conduit à une refonte majeure de la plateforme et a contribué à produire les données qui ont permis de valider les algorithmes de calcul des distances de visibilité.

Pour cette application de calcul des distances de visibilité, le télémètre laser (IBEO LD) a été placé à 2,70 m de hauteur à l'aplomb de l'arrière du véhicule. Cette hauteur permet aussi d'éliminer plus facilement les artefacts.

4.2 Système informatique embarqué

Le système informatique embarqué est dimensionné (puissance de calcul et capacité de stockage) pour assurer les fonctions :

- d'acquisition de forts volumes de données (télémétrie et images) issus de nombreux capteurs, à des vitesses et des résolutions en forte croissance.
- d'exécution des algorithmes grâce auxquels, en temps court (temps réel sans criticité), on fusionne toutes les données géo référencées et on reconstruit l'espace urbain ou rural en trois dimensions
- de restitution des images de la reconstruction avec les différentes vues : nuage de points, surfaces, texturation et coloration.
- de stockage de masse de toutes les données lors d'expérimentations longues et continues

L'informatique embarquée dans la plateforme LARA-3D repose sur le logiciel ^{RT}Maps ; il permet de récupérer et de traiter toutes les données des capteurs en temps réel avec des latences inférieures à la milliseconde.

Pour l'application du calcul des distances de visibilité, cet outil a permis de réaliser simultanément la fusion des données pour la géo-localisation et la mémorisation datée et synchronisée des nuages de points et des images de la caméra.

La figure 3 présente une vue d'une acquisition de la route et de ses côtés avec en arrière plan le logiciel ^{RT}Maps lors d'une campagne de relevés pour le projet DIVAS.

Figure 3 – Expérimentation pour l'application du calcul des distances de visibilité

5. Traitement des données pour le calcul des distances de visibilités

5.1 Construction d'un modèle et calcul des distances de visibilité

La plateforme LARA-3D permet à partir d'un ensemble de capteurs (GPS, centrale inertielle, scanner laser) de construire un nuage de points 3D géo-référencé (Figure). Les coordonnées 3D géo-référencées des points laser sont calculées à partir des coordonnées locales des points par rapport au laser avec l'information de localisation du système de navigation (Goulette et al. 2006).

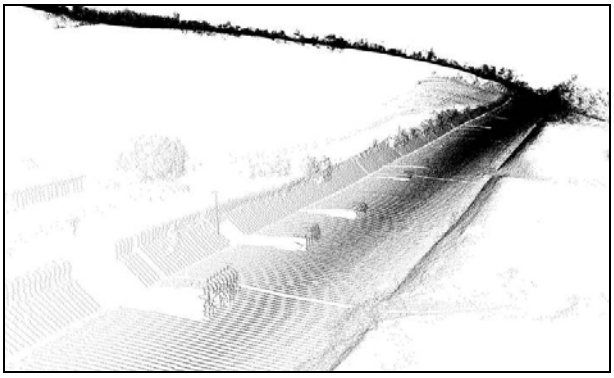


Figure 4 - Nuage de points 3D brut de la RD786 dans les Côtes d'Armor

A partir du nuage de points, un modèle 3D (ou maillage) de la route et de l'environnement routier est créé afin de servir de support pour les calculs de distance de visibilité. L'algorithme utilisé pour la modélisation est basé sur le Ball Pivoting Algorithm (BPA) de Bernardini et al. (1999) qui est une méthode plus rapide de triangulation que la triangulation de Delaunay et très adaptée aux données venant d'une numérisation laser. Un exemple de modèle 3D obtenu est visible sur la Figure . Ces modèles sont ensuite exploités par un logiciel développé par le LRPC de Strasbourg nommé « Qt-Ballad » pour construire des cartes de distance de visibilité sur itinéraire comme expliqué dans la communication de Charbonnier et al. (2007). La fiabilité des cartes de distance de visibilité dépendra directement de la qualité des modèles construits. Pour cela, nous avons développé des traitements spécifiques afin d'améliorer la qualité des modèles 3D. Les problèmes rencontrés au niveau de la modélisation sont principalement de deux sortes : la taille trop importante des modèles et la présence d'artefacts (voitures, camions sur la route lors de l'acquisition).

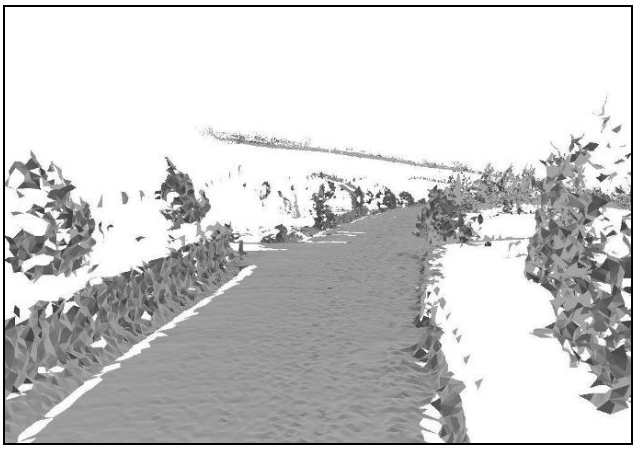


Figure 5 - Modèle 3D de la RD786

5.2 Améliorations apportées pour l'application de calcul de distances de visibilité

Pour les artefacts dus aux voitures roulant sur la route, nous avons développé une méthode spécifique qui nous permet d'enlever tous les objets au-dessus de la route.
Pour diminuer la taille des modèles, nous avons développé une méthode de décimation et de segmentation pour détecter les zones planes de l'environnement.

Suppression des artefacts

La Figure montre des artefacts présents dans les nuages de points bruts. Ce sont des voitures, des camions, des piétons captés par le laser lors de la numérisation mais qui doivent être supprimés pour la modélisation et pour permettre un calcul correct des distances de visibilité. Grâce à la position haute du laser (fixé en hauteur à environ 2,7 m du sol), nous pouvons capter l'environnement derrière les véhicules. Ces derniers entraînent des défauts dans le modèle 3D qui faussent les calculs de distance de visibilité, c'est pourquoi nous avons développé une méthode pour les enlever du nuage de point.

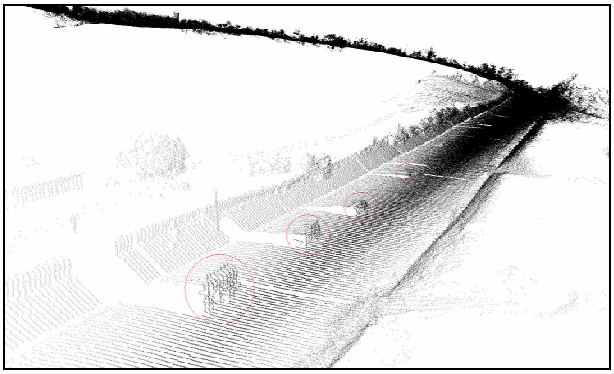


Figure 6 - Artefacts présents dans les nuages de points

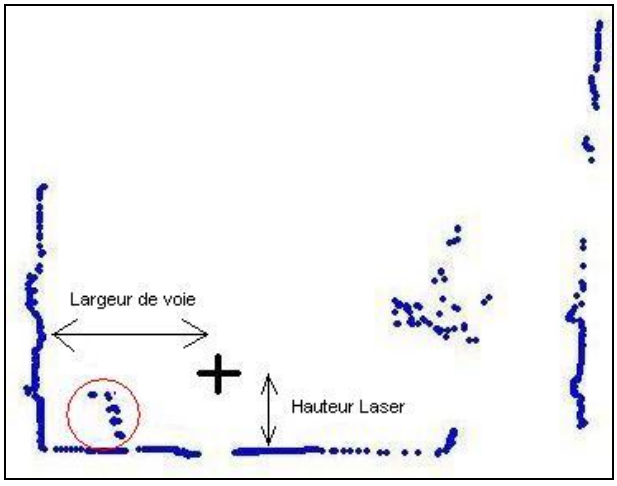


Figure 7 - Suppression des artefacts dans les profils laser

Pour supprimer ces artefacts, nous travaillons par profil laser, c'est-à-dire par couche transversale à la route. Avec deux paramètres qui sont la hauteur du Laser (la distance entre le point origine du laser et le sol) et la largeur de voie (de 3,5 m par voie pour les routes nationales), il est possible de segmenter, dans le profil, les objets présents sur la route et ceux en dehors de la route qui représentent l'environnement routier (Figure). Pour l'instant, notre méthode de décimation

des artefacts nécessite deux paramètres avec la largeur de voie à gauche et la largeur de voie à droite du prototype ce qui limite les expérimentations sur des tronçons où la largeur de voie reste fixe. Nous travaillons actuellement sur une méthode de détection automatique de ces paramètres. Les points laser des objets sur la route sont ainsi supprimés (Figure).

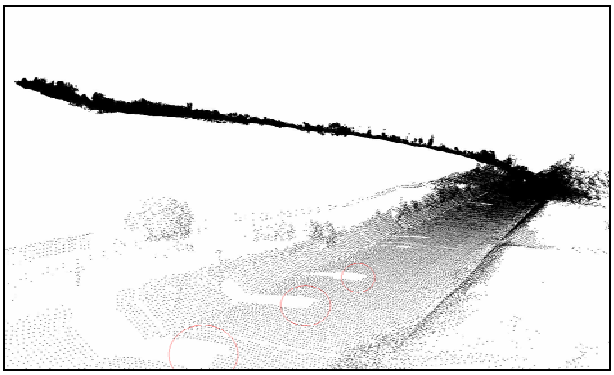


Figure 8 – Nuage de points sans artefacts

Diminution de la taille des modèles

Les nuages de points produits sont très volumineux en taille (environ 1M de points/km) ce qui produit environ 2M de triangles par km. Sachant que les calculs de distance de visibilité sont fondés sur une technique de lancer de rayon, les calculs deviennent trop longs pour de gros volume de données. Il est donc important de diminuer la taille des modèles sans perdre en qualité de modélisation de l'environnement.

Pour cela, nous effectuons une première décimation basée sur le voisinage. En effet, comme le scanner laser est un capteur qui donne des points à résolution angulaire fixe, nous obtenons pour des surfaces proches du capteur (comme la route) des surfaces sur-résolues. Nous conservons donc uniquement les points dont la distance au point le plus proche est plus grande que le bruit du scanner. Cette première décimation permet de passer de 1M de points/km à 500k points/km.

Nous effectuons ensuite une deuxième réduction des modèles par segmentation. La segmentation permet de reconnaître des zones spécifiques d'un nuage de points pour les modéliser avec un minimum de triangles. Nous avons choisi de nous restreindre à la distinction zone plane/zone non plane pour être suffisamment générique entre les différents environnements que nous pouvons rencontrer, tout en sachant que les plans sont les éléments architecturaux les plus présents dans notre environnement (une route pouvant être modélisée par juxtaposition de zones planes).

Tout d'abord, nous découpons le nuage de points en successions de petites sections de plusieurs profils (Figure). Les sections sont constituées d'un nombre fixe de profils successifs (par exemple 50 profils ce qui donnera 25 m de longueur pour un prototype équipé d'un laser à 10Hz et roulant à 20 km/h). Certaines méthodes de cartographie mobile (Carlberg et al. 2009) fonctionnent par triangulation entre profils. En raisonnant par section, nous restons sur du traitement temps réel avec une faible latence et nous traitons une information qui donne plus de valeur sémantique sur les objets présents que simplement leur profil.

Ensuite, dans chaque section, nous appliquons un algorithme rapide de détection de zones planes, que nous avons développé, basé sur un algorithme de croissance de région. La Figure montre un résultat de segmentation avec en bleu les zones planes et en violet le reste du nuage de points.

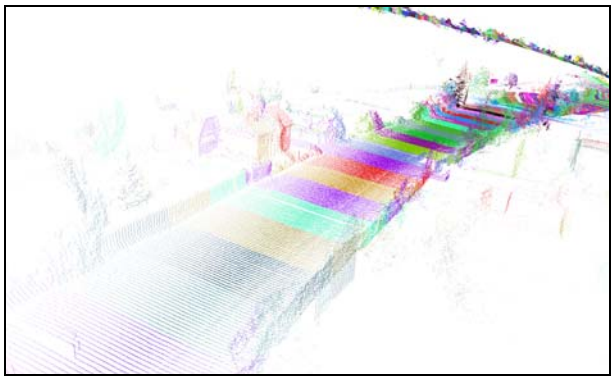


Figure 9 - Découpage des nuages de points en sections

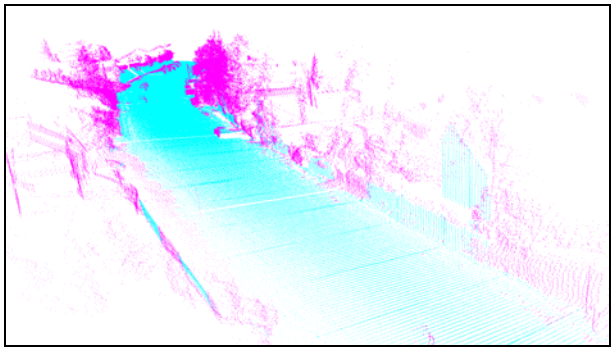


Figure 10 - Détection des zones planes du nuage de points 3D

A partir de cette segmentation, l'objectif est de réduire le nombre de triangles dans chaque zone plane. Pour cela, nous projetons chaque point sur le plan détecté. Ensuite, on construit une triangulation fondée uniquement sur les bords des plans.

La Figure montre une triangulation qui a été appliquée avec la segmentation en zones planes. La triangulation des zones planes et non-planes est aussi basée sur l'algorithme BPA. Cette segmentation permet de passer de 500k points/km à 250k points/km ce qui donne un maillage avec 500k triangles/km.

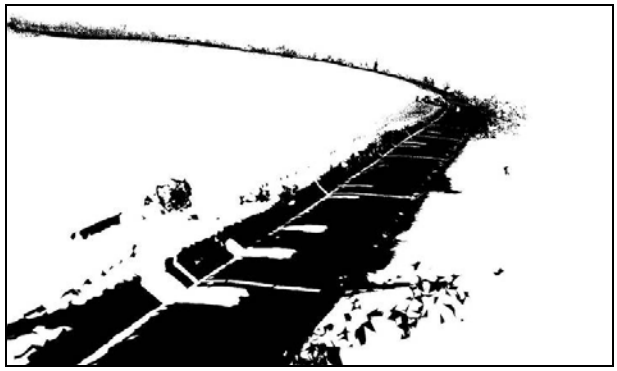


Figure 11 - Triangulation avec prise en compte des zones planes

Nous voyons ainsi que la taille du modèle 3D a diminué d'un facteur 4 avec la décimation et la segmentation en zones planes.

6. Conclusion

La plate-forme de cartographie mobile LARA-3D n'est pas dédiée à une application particulière ; mais elle doit en permanence être remaniée afin de répondre au mieux aux exigences des travaux de recherche en cours. Cet article a présenté, à l'occasion du projet DIVAS, les améliorations apportées tant du point de vue matérielle que logiciel sur une plateforme d'acquisition mobile afin qu'elle soit le mieux adaptée possible aux besoins de l'application du calcul des distances de visibilité. Le prototype LARA-3D pourrait devenir plus opérationnel à grande échelle avec ces différentes améliorations : il serait alors envisageable d'industrialiser la méthode avec des véhicules dédiés.

Références

- Asai, T., Kanbara, M., Yokoya, N. (2004), "3D Modeling of Wide Area Outdoor Environments by Integrating Omnidirectional Range and Color Images", Int. Symposium on Mixed and Augmented Reality.
- Bernardini F., Mittelman J., Rushmeier H., Silva C., Taubin G. (1999), "The Ball-Pivoting Algorithm for Surface Reconstruction", IEEE Trans. On Visualization and Computer Graphics, vol. 5 no. 4, p. 349-359.
- Carlberg, M., Andrews, J., Gao, Peiran, Zakhor, A. (2009), "Fast Surface Reconstruction and Segmentation with Ground-Based and Airborne LIDAR Range Data", EECS Department, University of California, Berkeley
- Charbonnier, P., Goulette F., Philipps, N., Blaes, S., Bertoncini, C., Brun, X. (2007), « Mesure de la visibilité géométrique à partir d'un modèle 3D de la route et de son environnement proche », Livrable Action 1.2 document B, Consortium VIZIR, projet PREDIT SARI.
- Fruh, C., Jain, S., Zakhor A. (2005), "Data Processing Algorithms for Generating Textured 3D Building Façade Meshes from Laser Scans and Camera Images", Int. Journal of Computer Vision, Volume 61, Issue 2, p. 159-184.
- Goulette, F., Nashashibi, F., Abuhadrous, I., Ammoun, S., Laurgeau, C. (2006), "An Integrated On-Board Laser Range Sensing for On-The-Way City and Road Modelling", Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol 34, Part A.
- Ingensand H. (2006), "Metrological Aspects In Terrestrial Laser-Scanning Technology", 3rd IAG/12th FIG Symposium, Baden, May 22-24.

ÉVALUATION DU RISQUE EN RELATION AVEC LA VISIBILITÉ - PROPOSITION D'INDICATEURS DE RISQUE

Diplômé de l'ENTPE en 1993, ingénieur divisionnaire, adjoint au chef du département *Conception et exploitation durables des infrastructures* au Centre d'études techniques de l'Equipement Méditerranée depuis 2006. Qualification d'expert par le comité de domaine « routes ».

Lionel PATTE
CETE Méditerranée, DCEDI
Aix-en-Provence, France

Résumé
La visibilité, critère fondamental de sécurité, est associée à diverses règles de conception routière. Ces règles se basent souvent sur la distance d'arrêt dont l'évaluation reste délicate, les paramètres d'influence étant nombreux. Un modèle pour la distance d'arrêt des véhicules légers est constitué à partir de la littérature et de bases de données. Une distribution réaliste des distances d'arrêt en est déduite par une simulation de Monte-Carlo. Une comparaison avec les distances de visibilité offertes permet d'inférer sur le niveau de risque. Plusieurs indicateurs de risques sont ainsi proposés, pour le gestionnaire ou pour un profil d'usager particulier. La sensibilité des indicateurs de risque au paramétrage du modèle est ensuite analysée. La vitesse et l'ABS ont une influence majeure sur le risque. Des analyses similaires sont également menées en intégrant la gravité de la collision. La modélisation et ses résultats offrent des perspectives pour l'évolution des règles de l'art, pour l'instruction des dérogations, pour l'évaluation *ex ante* de mesures ou de politiques de sécurité.

Mots-clés: Distance de visibilité, indicateurs de risque, distance d'arrêt, freinage, adhérence, ABS, sécurité routière, Monte Carlo

Abstract
Visibility, as an essential safety criterion, is connected with several rules of road design. These rules are often based on stopping distance, which is not easy to evaluate since many parameters may influence it. A model to estimate the stopping distance of light cars is here built up from literature and from data bases. A realistic distribution of stopping distances is then deduced from this model through a Monte-Carlo simulation. By comparing the distribution with available sight distances it is possible to make conclusions on the hazard level. Several hazard indicators are thus put forward either for the road administrator or for a specific driver profile. Then, the sensitivity of the hazard indicators to the model configuration is analysed. Speed and ABS have a major influence over hazard. Similar analyses are also made including the severity of the collision. Modelling and the results obtained through it give prospects to make standard rules evolve, to set up special dispensations or to assess *ex ante* safety measures or policies.

Keywords: Sight Distance, Hazard Indicators, Stopping Distance, Braking, Skid Resistance, Anti-block Brake Systems, Road Safety, Monte-Carlo.

1. Introduction

La visibilité est l'un des principaux critères d'appréciation de la sécurité des routes (Sétra et Cetur 1992) et diverses règles de conception lui sont associées, comme dans les publications du Sétra (1994 et 2000) ou de l'AIPCR (2003). Qu'il s'agisse de voies en service ou de projets neufs, les situations pour lesquelles la visibilité offerte est inférieure à ce que préconisent les règles de l'art (distance d'arrêt sur obstacle, visibilité mutuelle en carrefour...) sont fréquentes. Par ailleurs, l'application stricte des recommandations peut induire des mesures exorbitantes dans des configurations topographiques défavorables, mais aussi de forts impacts environnementaux. Le souci d'un développement durable implique de trouver un compromis acceptable entre les risques routiers et les conséquences économiques et environnementales.

Les recommandations font souvent intervenir la notion de distance d'arrêt pour caractériser les besoins en termes de visibilité. Très fluctuante (selon les aptitudes du conducteur et sa vitesse de circulation, les conditions météorologiques, l'état de la chaussée ou du véhicule...), la distance d'arrêt est calculée pour des conditions dites conventionnelles. La valeur adoptée pour chacun des paramètres d'influence se base habituellement sur des données empiriques et intègre des marges de sécurité plus ou moins grandes. Les limites d'une telle approche déterministe sont notamment identifiées par Sarhan et Hassan (2007). Elle ne permet pas de cerner le niveau de sécurité offert : est-il suffisant ou inversement, n'est-il pas exagérément contraignant ? De plus, certaines règles paraissent immuables alors que les technologies des véhicules, les techniques de chaussée, les comportements évoluent sans cesse.

Une première approche probabiliste avait été adoptée par l'auteur (Patte, 2002) pour la validation *a posteriori* les distances de visibilité recommandées sur autoroute, et non comme réflexion *a priori*. Elle indiquait que les distances recommandées étaient seulement dépassées dans 6% des situations susceptibles d'être rencontrées sur chaussée mouillée et 2% pour l'ensemble des situations. La démarche comportait néanmoins plusieurs limites, négligeant un certain nombre de paramètres (ABS) et s'appuyant sur des données anciennes (adhérence). Un travail réalisé dans le cadre de l'opération de recherche « Risques routiers » (Patte, 2009), propose une nouvelle approche des risques liés à la visibilité, didactique et plus complète.

2. Démarche et éléments de méthode

2.1 Scénarios d'accidents concernant la visibilité

Les scénarios d'accidents liés à des problèmes de visibilité sont très variés. Néanmoins, dans une majorité de cas, on peut se ramener à la configuration simplifiée suivante : un automobiliste circulant en section courante doit faire face à une situation inattendue, se traduisant par un obstacle sur la chaussée, fixe ou mobile, initialement masqué, et nécessitant un freinage d'urgence – en général, la manœuvre d'évitement est en pratique impossible. Cet obstacle peut être un véhicule arrêté, un véhicule s'engageant à faible vitesse dans une intersection, un véhicule venant en sens opposé sur la même voie, un piéton, un animal, etc.

2.2 Fonction de performance et modélisation

Sarhan et Hassan montrent que le risque pour de tels scénarios d'accidents peut être appréhendé comme une application de l'analyse de fiabilité. Celle-ci traite des incertitudes de la fonction de performance (F) qui décrit le rapport entre l'offre (O) et la demande (D) du système, en fonction des variables indépendantes : $F = O - D$. Les valeurs négatives prises par F traduisent alors un risque d'accident.

Un modèle pour la distance d'arrêt des véhicules légers est constitué à partir de la littérature et de bases de données. Une distribution réaliste des distances d'arrêt en est déduite par une simulation de Monte-Carlo. Une comparaison avec les distances de visibilité offertes permet d'inférer sur le niveau de risque. Dans les analyses présentées ici, la demande (D) est assimilée à la distance d'arrêt, tandis que l'offre (O), représentée par la distance de visibilité effective ou offerte, est considérée comme un paramètre du problème. Mais, comme l'illustrent les travaux de Sarhan et Hassan (2007) et Patte (2002), transformer l'offre en matière de visibilité en variable aléatoire est aisé (la distance de visibilité dépend notamment de la position de l'œil du conducteur et de sa position latérale sur la chaussée). Par abus de langage, le modèle pour la distance d'arrêt est confondu celui pour le scénario d'accident identifié *supra*. Dans un second temps, la gravité est introduite dans la modélisation du risque, en tenant compte de la vitesse résiduelle au moment de la collision.

Les analyses et résultats présentés ici sont relatifs d'une part à une chaussée mouillée et d'autre part à des véhicules légers – véhicules particuliers ou utilitaires légers, mais la démarche est largement transposable à d'autres configurations.

2.3 Indices de risque : notions et définitions

Plusieurs indicateurs de risques sont définis puis utilisés.

Indices de risque pour la visibilité, absolu ou relatif
On considère que l'usager est en sécurité dans une situation donnée (au titre de la visibilité en section courante par exemple), si la distance de visibilité offerte (D_V) est supérieure à la distance de visibilité requise pour effectuer correctement la manœuvre adéquate, soit en section courante la distance d'arrêt (D_A). Il paraît naturel de considérer comme indice de risque de visibilité (IR_V) la probabilité d'une visibilité « insuffisante ». A partir de IR_V, on peut aussi définir un indice de risque relatif (IRR_V), en rapportant le risque mesuré à celui constaté dans une situation de référence donnée.

Indices de risque individuel et collectif : une question de point de vue
IR_V (ou IRR_V) peut s'exprimer globalement, pour l'ensemble du flot de véhicules. C'est le point de vue du gestionnaire qui souhaite disposer d'un indicateur corrélé au risque d'accidents sur une section donnée. La demande en matière de visibilité sera déterminée en tenant compte de l'ensemble des conducteurs (et des paramètres associés). Mais IR_V peut aussi s'exprimer pour un conducteur donné, compte tenu de son profil : vitesse pratiquée, état de son véhicule, etc. Le conducteur ne maîtrise en revanche pas certains paramètres liés à l'infrastructure, comme l'adhérence. On parle alors d'indice de risque individuel ($IR_V(i)$).

Indices de risque conventionnels
Si la distance de visibilité varie le long d'un parcours, elle est supposée être au moins égale, en section courante de routes ou d'autoroutes, à la distance d'arrêt conventionnelle (D_C). On peut alors définir la notion de niveau de risque conventionnel (IR_{VC}) comme la probabilité que D_A soit supérieure à D_C. Dans le même esprit, on peut définir un indice de risque conventionnel individuel ou un indice de risque relatif conventionnel.

3. Modélisation de la distance d'arrêt

3.1 Formulation générale

La formulation générale adoptée est donnée par l'équation (1).

$$D_A = t_{PR}.V_0 + \frac{1}{g}\int_{V_0}^{0} \frac{v}{\gamma(v) + p}\,dv \qquad (1)$$

avec : t_{PR} : distance de perception-réaction
V_0 : vitesse initiale, en m/s ;
p : la déclivité, en valeur algébrique ;
$\gamma(V_0)$: la décélération instantanée, et exprimée en fraction de g (= 9,81 m/s²).

Le second membre de l'équation (1) correspond à la distance de freinage. Sa formulation, plus complexe que celle utilisée habituellement dans les recommandations, traduit la variabilité de la décélération lors du freinage. En outre, la décélération ne se confond pas avec l'adhérence mobilisable, encore moins avec un coefficient de frottement longitudinal (CFL). Cela suppose que le système véhicule-conducteur est apte à mobiliser toute l'adhérence disponible – hypothèse critiquée par Fambro et al. (1997), car non représentative des aptitudes des conducteurs – et que le freinage s'effectue dans les conditions de mesure de l'adhérence.

3.2 Les paramètres du modèle

La distribution retenue pour chacun des paramètres est généralement déduite de la littérature. Le travail sur le paramétrage du modèle ne sera pas détaillé ici, mais une synthèse en est donnée par le tableau 1. Quelques spécificités méritent néanmoins d'être soulignées.

Tableau 1 - Paramétrage du modèle - cas des autoroutes

Variable		Symbole	Unité	Loi statistique	Moyenne	Ecart-type
Temps de perception réaction		T_{PR}	s	Gamma	1,19	0,28
Vitesse initiale		V_0	km/h	Gamma (décalée et inversée)	120	19
Profondeur de sculpture		h_s	mm	Triangulaire	5,7	2
Équipement ABS		F_{ABS}	logique	Discrète : 75% oui ; 25% non	-	-
Décélération du conducteur	avec ABS	γ_{cond}	g	Gamma (décalée et inversée)	0,65	0,12
	sans ABS				0,45	0,09
Type de pneu		F_p	Coef.	Normale	1,1	0,05
CFL(v)		$\mu_{bloq}(v)$	Coef.	Base CARAT, CFL 120 >	35	9
μ_{max}/μ_{bloq}		R_μ	Coef.	Normale	1,61	0,15

Les principales originalité et difficulté tiennent à la détermination de la décélération effective (γ) du véhicule, en tenant compte simultanément de l'adhérence mobilisable (μ) et de l'aptitude du conducteur à la mobiliser (γ_{cond}). Il apparaît nécessaire de distinguer deux cas selon que le véhicule est équipé ou non de l'ABS. En effet, le système de freinage influe non seulement sur l'adhérence mobilisable (Delanne, 2005) mais aussi sur la décélération admissible par les conducteurs (Greibe, 2008) (Kudarauskas, 2007) (Mavromatis et al., 2005).

La décélération γ est schématiquement déterminée comme suit :

- elle est égale à l'aptitude du conducteur à freiner en urgence, dans la limite du niveau permis par l'adhérence (μ), soit $\gamma = \inf(\mu ; \gamma_{cond})$;
- μ est défini à partir du modèle de Pacejka (Delanne, 2005) faisant intervenir le taux de glissement. Ainsi, avec l'ABS $\mu = 0{,}95.\mu_{max}$, sinon $\mu = \mu_{bloq}$ (freinage roues bloquées) ;
- μ_{bloq} est fonction de la hauteur d'eau, de l'état des pneumatiques et du CFL ;
- Le CFL dépend de la vitesse (et varie donc lors du freinage) et du type de revêtement. On adopte pour CFL(v), le modèle du type Pennsylvania Transportation Institute : CFL (v) =

$CFL_0.e^{bV}$. Les paramètres du modèle sont obtenus par échantillonnage de données de la base CARAT, jugées représentatives de la situation française.

- μ_{max} est calculé à partir de μ_{bloq} et du ratio R_μ entre ces deux paramètres ;
- les paramètres (v, γ_{cond}, h_S, R_μ, F_{ABS}...) sont déterminés à partir de distributions statistiques tirées de la littérature (ibid.) (Unifi et al ; 2000) (UTAC, 2008).

Le modèle pour D_A s'écrit alors à partir de l'équation 1 (dans le cas d'une pente nulle) :

$$D_A\,(sans\ ABS) = t_{PR}.V_0 + \frac{[(1+bv).e^{-bv}]_{V_0}^{0}}{CFL_0.F_{hs}.F_P.b^2.g} \qquad (2)$$

$$D_A(avec\ ABS) = t_{PR}.V_0 + \frac{[(1+bv).e^{-bv}]_{V_0}^{0}}{0{,}95.R_\mu.CFL_0.F_{hs}.F_P.b^2.g} \qquad (3)$$

3.3 Validité du modèle

La validation du modèle s'appuie sur des essais de freinage issus de deux campagnes : LCPC (panel de 22 véhicules légers) et LRPC de Lyon (séries de distances de freinage pour divers revêtements). Les résultats sont satisfaisants : le modèle fournit des résultats conformes aux essais en grandeur réelle, aussi bien pour les valeurs moyennes que pour la dispersion. Le modèle paraît sensiblement pessimiste (de 3 ou 4 m) pour des vitesses inférieures à 80 km/h, mais très bien calé (environ 1 m) pour des vitesses initiales supérieures − celles qui nous intéressent le plus ici. Le modèle rend également compte de façon réaliste des écarts de performance entre véhicules équipés d'ABS et ceux qui ne le sont pas. Des mesures dans des conditions plus variées seraient cependant nécessaires pour valider complètement le modèle.

3.4 Résultats fournis par le modèle

La distance sur obstacle recommandée pour les autoroutes (280 m pour 130 km/h) permet de couvrir 98% des situations sur chaussée mouillée (cf. figure 1). Inversement, seule une distance de visibilité très supérieure à 280 m permet l'arrêt de quasiment tous les véhicules en toute circonstance. L'analyse des résultats montre que les valeurs de distance d'arrêt simulées dépassant 280 m correspondent dans plus de 95% des cas à des vitesses excédant la limite autorisée, et dans près de 90% des cas à un véhicule sans ABS, et souvent aux deux.

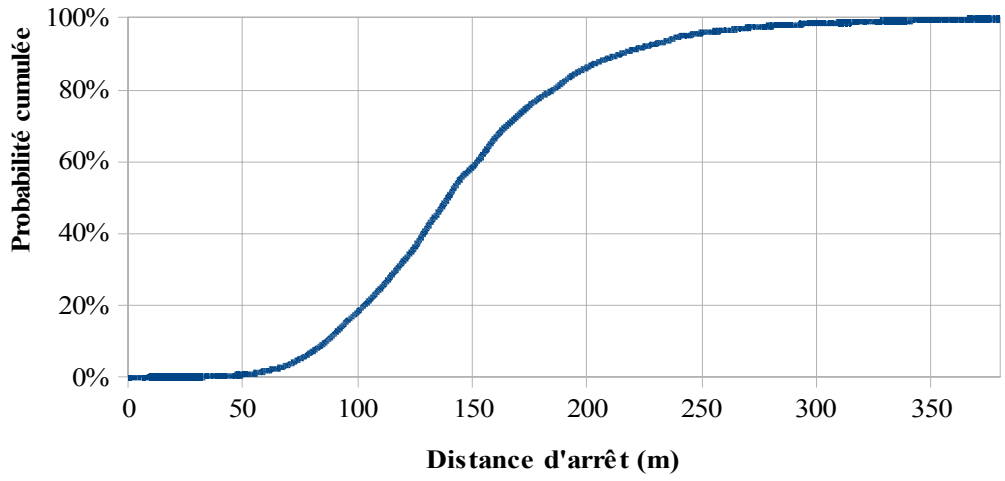


Figure 1 –Distribution des distances d'arrêt simulées - cas des autoroutes de liaison

4. Calcul des indicateurs de risque lié à la visibilité sur autoroute

Pour l'application numérique, nous prendrons le cas d'une autoroute de liaison et d'une distance de visibilité offerte égale à la valeur recommandée (280 m). La distribution cumulée des distances d'arrêt (figure 1) donne directement la valeur de l'indice de risque visibilité conventionnel (IR_{VC}) sur chaussée mouillée : 2% environ. Ce n'est autre que le niveau de risque associé aux valeurs recommandées. La modélisation permet aussi d'évaluer la sensibilité des indicateurs à l'évolution de certains paramètres (cf. tableau 2).

Tableau 2 - Indicateurs de risques conventionnels pour différents scénarios d'évolution

Code	Scénario	IRv_c	$IRRv_c$
Référence (paramétrage représentative de la situation actuelle en France)		2,10%	1,00
$h_S > 1,6$ mm	Disparition des pneumatiques non conformes	2,00%	0,95
$h_S > 5$mm	Maintien en bon état de l'ensemble du parc	1,55%	0,74
0% d'ABS	Niveau ancien avant l'arrivée de l'ABS	7,60%	3,62
90% d'ABS	Évolution du parc automobile à moyen terme	1,05%	0,50
100% d'ABS	Systématisation de l'ABS	0,20%	0,10
V < 135 km/h	Dissuasion des vitesses excédant la limite autorisée (+marge d'erreur)	0,07%	0,03
V + 10km/h	Augmentation du niveau général des vitesses de 10 km/h	4,85%	2,31
CFL >1er décile	Suppression des valeurs les plus faibles	1,55%	0,74
BBDr	Chaussées avec revêtement bitumineux drainant	1,45%	0,69
$\gamma_{cond} > 50\%$	Amélioration de l'aptitude au freinage d'urgence (suppression des performances en deçà du niveau médian de la situation de référence)	0,83%	0,40
$t_{PR} < 1,0$s	Amélioration de la vigilance (système d'aide à la conduite *ad hoc).*	1,45%	0,69

Le taux de pénétration de l'ABS a une influence majeure. Un niveau de 90%, équivalent au taux d'équipement des véhicules neufs en Europe, divise par 2 le niveau de risque par rapport au niveau actuel, estimé à 75%. Par ailleurs, la fraction du parc de véhicules non équipé d'ABS présente un niveau de risque 36 fois plus élevé que celle qui en bénéficie. Les vitesses pratiquées ont également une influence forte. Ainsi, la maîtrise des vitesses pratiquées en deçà du niveau réglementaire (majoré d'une tolérance de 5 km/h), conduirait à diviser le niveau de risque conventionnel par 30. L'influence de la profondeur de sculpture (h_S) est sensible mais pas majeure. Ainsi, même en maintenant l'état des pneumatiques pour l'ensemble du parc dans un bon état, largement supérieur au niveau réglementaire, l'indice de risque baisse seulement de 20%. Jouer sur les aptitudes du conducteur peut également s'avérer efficace. L'obtention du temps de réaction assez court (inférieur à 1 s), par une détection précoce des obstacles et une activation rapide du système de freinage, ferait baisser le niveau de risque de 30%. Améliorer par des formations *ad hoc* les performances des conducteurs lors de la phase de freinage pourrait être très intéressant. Si de telles performances pouvaient se situer au-dessus du niveau médian actuel, le risque conventionnel baisserait de 60%. L'adhérence présente également une influence sensible. Ainsi, le traitement des sites présentant les adhérences les plus faibles en termes de CFL 120 (valeurs inférieures au 1er décile, soit 0,20 environ), conduirait à une réduction du risque de 25% environ. Par ailleurs, le risque apparait comme moins fort pour un BBDr que pour les autres revêtements (-30%), en raison de la faible sensibilité du CFL d'un BBDr à la vitesse. Reste à prouver que le confort accru par temps de pluie avec cette technique n'accroît pas les vitesses pratiquées.

On retrouve des tendances similaires pour des distances de visibilité différentes de 280 m sur autoroute, mais aussi dans le cadre d'une analyse des risques sur les routes.

5. Prise en compte de la gravité

Les risques modélisés supra correspondent à des accidents corporels ou matériels et ne traduisent pas la gravité de l'évènement. La gravité est liée à la décélération lors du choc (Hobbs, 1984). Elle dépend aussi d'autres facteurs : véhicule et équipement, port de la ceinture, angle de choc, obstacle heurté, etc. La littérature donne sous la forme d'une relation dose-effet, la probabilité pour un occupant de subir des lésions d'un certain niveau (selon l'AIS, *abbreviated injury scale*) en fonction de la variation de la vitesse lors de la collision. En pratique, une fonction sigmoïde (équation 4) est ajustée sur les données empiriques correspondant au niveau de gravité AIS 3 ou plus, pour le cas d'un conducteur ceinturé.

$$P(AIS \geq 3) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}.\tanh(\frac{\Delta V - m}{2s}) \quad (4)$$

où m et s, notent respectivement la moyenne et l'écart-type de la distribution.

A partir du modèle présenté au § 3, il est possible de déterminer, s'il y a effectivement collision, et le cas échéant la vitesse de collision (V_C). Pour déterminer ΔV à partir de V_C en tenant compte de la variété des situations, tout en évitant des considérations compliquées (e. g. la nature de l'obstacle heurté), deux scénarios de choc très contrastés sont définis :
1 – un choc violent, impliquant une variation de vitesse maximale, équivalente à la vitesse du mobile au moment du choc ($\Delta V = V_C$).
2 – un choc modéré, impliquant une variation de vitesse équivalente à la moitié de la vitesse lors du choc ($\Delta V = 0{,}5.V_C$).

Un indice de danger (ID) est défini comme la probabilité d'avoir un accident grave dans une situation donnée. On peut définir comme ci-dessus, un indice de danger relatif (IDR), en rapportant l'indice de danger calculé à celui d'une situation de référence. Les indices de danger ID1 et ID2 correspondent respectivement aux deux scénarios définis *supra*.

La simulation montre que le scénario de choc n'est pas crucial ; si les valeurs des indices de danger ID1 et ID2 sont logiquement très différentes (ID1 est 5 à 6 fois plus élevé que ID2), les indices de danger relatifs associés (IDR1 et IDR2) sont, eux, très proches (cf. figure 2).

La variation du paramétrage a une influence similaire sur IDR et sur IRR, sauf en ce qui concerne les vitesses pratiquées : IDR y apparaît plus sensible que IRR. Cela s'explique facilement car une augmentation des vitesses joue à deux niveaux : sur le risque d'accident en augmentant la distance d'arrêt, mais aussi sur la gravité en augmentant la vitesse de choc.

ID (ou IDR) décroît de façon exponentielle avec la distance de visibilité offerte (Dv). La corrélation entre ID et Dv est très forte ($R^2 > 0{,}99$) dans le cadre d'une régression linéaire avec une loi exponentielle. Par exemple, ID (et donc le risque d'accident grave) est multiplié par plus de 9 pour une réduction de la distance de visibilité de 100 m, et ce quelle que soit la situation de référence ; que l'on passe de 380 m à 280 m, ou de 280 à 180 m par exemple. Il varie d'un facteur 2 pour une variation de 30 m, de 280 à 250 m par exemple.

Ces résultats invitent à proposer un indicateur dérivé de ID, dont la variation est plus linéaire et croissant dans le même sens que le niveau de sécurité. L'indicateur proposé, appelé index de sécurité conventionnel pour la visibilité, s'écrit naturellement :

$$IS_C = - \ln(IDR_C) \quad (5)$$

Par définition, cet index vaut 0 pour une distance de visibilité « de référence », égale à la distance d'arrêt conventionnelle. Pour les autoroutes, on a la relation simple suivante :

$$IS_C = 0{,}0225\ Dv - 6{,}31 \qquad (6)$$

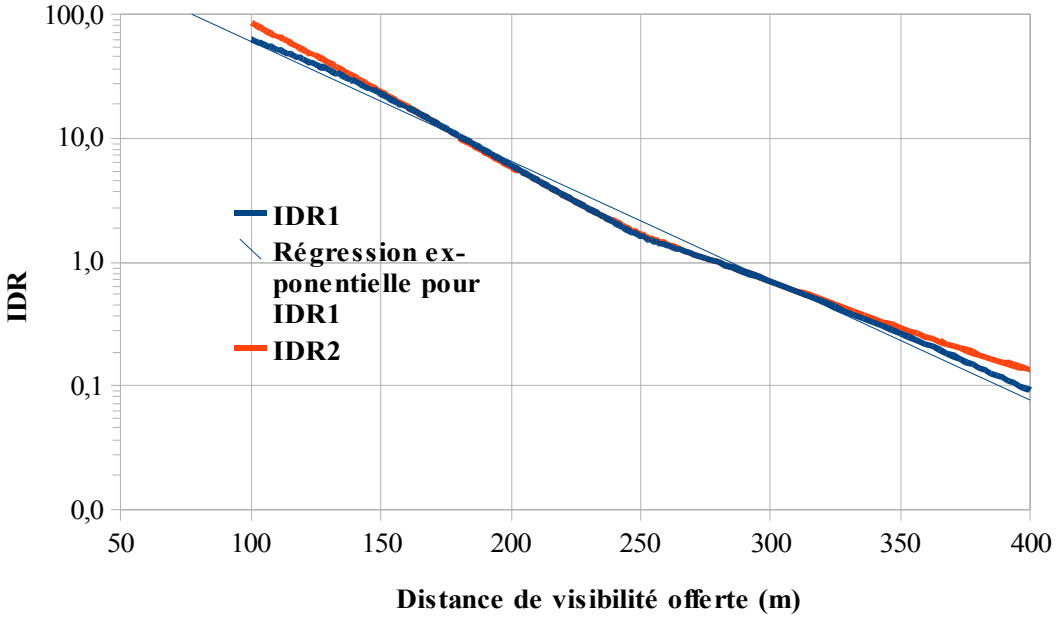


Figure 2 – Variation des indices de danger relatifs en fonction de la distance de visibilité

6. Conclusions et perspectives

L'utilisation d'approches probabilistes est naturelle pour appréhender les risques liés à l'usage de la route, en compléments d'approches plus classiques (épidémiologiques, cliniques...). Les difficultés pour sa mise en œuvre résident dans l'identification de scénarios d'accidents réalistes associés à des enjeux significatifs, puis dans la définition d'un modèle le décrivant fidèlement. Le modèle proposé ici pour la distance d'arrêt de véhicules légers permet d'appréhender plusieurs scénarios d'accidents liés à des problèmes de visibilité.

L'ambition de cette modélisation est de rendre compte des principaux facteurs d'influence. L'originalité par rapport à d'autres travaux est de prendre en compte les facteurs limitants dans le freinage qu'ils soient liés à l'aptitude du conducteur ou à l'adhérence mobilisable résultant des caractéristiques des pneumatiques et de la chaussée. Pour cela, le travail s'appuie sur une large revue de la littérature internationale. Le compromis adopté entre réalisme et simplicité est conforté par les analyses de validité, confrontant les résultats du modèle à des mesures en vraie grandeur réalisées avec des conducteurs lambdas. Les autres avantages sont la simplicité de l'outil (basé sur un tableur), sa souplesse d'utilisation (paramétrage configurable *ad libitum*) et la rapidité des calculs. Le modèle présente forcément certaines limites dans les situations qu'il est apte à représenter, mais il pourrait facilement évoluer pour étendre son domaine d'emploi (poids lourds, chaussée sèche, voirie urbaine).

Les analyses et résultats présentés *supra* suggèrent des usages multiples dans différents registres, sur les plans théorique, pédagogique ou pratique.

1) L'influence des conditions de visibilité sur la sécurité est indéniable mais difficile à caractériser. Les indicateurs de risque ou de sécurité proposés ici fournissent des informations simples, interprétables sur le niveau de sécurité. Ils ont une signification intuitive, par exemple la probabilité qu'un automobiliste ait un accident occasionnant des blessures graves.

2) L'étude de la sensibilité des indicateurs de risque permet de cerner et hiérarchiser les paramètres les plus d'influents, ainsi que les mesures les plus efficaces pour réduire le nombre d'accidents liés à la visibilité. Si la très forte influence des vitesses pratiquées n'est pas surprenante, les résultats peuvent venir objectiver et appuyer des actions de sensibilisation. Au niveau du véhicule, l'équipement en ABS permet de réduire considérablement les risques : la fraction du parc qui en est équipée présente un risque 36 fois plus faible que celle qui n'en est pas équipée. Au niveau de l'infrastructure, l'influence de l'adhérence est également mise en évidence et pourrait être intégrée dans les critères d'entretien des chaussées, voire dans les critères de choix des couches de roulement (cas des BBDr).

3) Les règles de visibilité définies actuellement dans la plupart des recommandations techniques en vigueur en France, et les valeurs seuil associées offrent d'une part une certaine garantie de sécurité, mais sont aussi particulièrement conséquentes en termes de profil en long, de dégagement latéral, etc. Or, les résultats obtenus dans le cadre d'une approche probabiliste interpellent à plus d'un titre. D'abord, la distance d'arrêt conventionnelle n'a pas vraiment de signification concrète : elle ne représente pas une situation type, moyenne, maximale, par exemple, mais une valeur quelconque de la distribution des distances d'arrêt, par exemple le 98^{è} centile pour les autoroutes. Ensuite, le risque par rapport à certains scénarios d'accidents a manifestement dû baisser ces dernières années, en relation notamment avec l'évolution de la pénétration de l'ABS dans le parc automobile.

4) L'allure de la distribution de la distance d'arrêt, comme celle des courbes des indicateurs de risque en fonction de la distance de visibilité, ne rend néanmoins pas triviale la définition d'une limite pertinente. En effet, ces courbes sont homogènes, sans effet de seuil significatif et varient rigoureusement de façon exponentielle avec la distance de visibilité offerte. Aussi, plus que la notion de seuil, valeur intangible et rigide, la réalité du phénomène ainsi mise en évidence, conduit à proposer la définition de plusieurs classes de risques (ou de sécurité), à l'instar ce qui est fait en matière de niveau de service. Des niveaux de sécurité différents pourraient être adoptés en fonction des enjeux de sécurité, du type de voie, des contraintes d'aménagement et surtout de la politique du gestionnaire de la voirie.

5) S'il est délicat de définir un niveau de sécurité à offrir aux usagers, il convient a minima de s'interroger sur la cohérence entre les niveaux de sécurité associés aux différentes règles de conception, du moins celles dont les principales justifications sont liées à la sécurité. Il faut alors tenir compte à la fois du risque et de l'exposition au risque. Par exemple, le niveau de fiabilité atteint pour la visibilité en section courante n'est-il pas trop élevé par rapport à celui offert pour la visibilité en carrefour, la visibilité d'approche des giratoires ou les questions de pertes de contrôle en virage, surtout eu égard aux enjeux de sécurité respectifs ?
Les considérations relatives aux règles de l'art évoquées supra, pourraient être prise en compte dans le cadre de la refonte de l'ICTAVRU pour laquelle la question d'une mise à plat des paramètres dits fondamentaux est posée.

6) Au-delà de la pertinence des règles de l'art relatives à la visibilité, un tel modèle permet d'objectiver les demandes de dérogation à ces règles dans le cadre de projets routiers, dans une approche coût/avantage, ainsi que le suggère la circulaire DGR du 8/01/2008.

In fine, si les approches probabilistes ou, d'une façon générale, la simulation peuvent s'avérer très utiles ou pédagogiques, un modèle reste un outil. Il n'épargne pas une réflexion sur le niveau de sécurité visé ou, plus globalement, la définition d'une politique de sécurité pour l'aménagement ou l'exploitation des infrastructures. On peut souhaiter qu'il permette déjà de révéler la complexité de phénomènes souvent trop simplifiés et qu'il contribue à poser les bases d'une réflexion de fond sur les règles de conception relatives à la visibilité.

Références

- AIPCR - Comité C13 (2003), « Manuel de Sécurité routière », AIPCR, La Défense.
- Cetur, (1991) « Instruction sur les Conditions Techniques d'Aménagement des Voies Rapides Urbaines », Lyon.
- Delanne, Y., (2005), « Adhérence des pneumatiques, adhérence conventionnelle, comparaison et liaison avec la texture », Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées n°255, avril – juin 2005, pp. 35 – 49, LCPC, Paris.
- Delanne, Y. (2005), « Potentiel d'adhérence du couple pneumatique/chaussée. V2.0 », LCLC, Nantes.
- DGR, (2008), « Circulaire du 7 janvier 2008 fixant les modalités d'élaboration, d'instruction, d'approbation et d'évaluation des opérations d'investissement sur le réseau routier national ».
- Fambro, D.B., K. Fitzpatrick, R.J. Koppa. (1997), "Determination of Stopping Sight Distance", National Cooperative Highway Research Program, NCHRP Report 400, Transportation Research Board, Washington.
- Greibe, P. (2008), "Determination of Braking Distance and Drivers Behavior Based on Braking Trials", Transportation Research Board 2008 Annual Meeting, Washington.
- Hobbs, C.A., Mills, P. (1984), "Injury Probability for Car Occupants in Frontal and Side Impacts", TRRL laboratory report n° 1124, Crowthorne, Berkshire.
- Kudarauskas, N. (2007), "Analysis of Emergency Braking of a Vehicle". Transport, 2007, Vol XXII, No 3, 154–159.
- Mavromatis, S., Psarianos, B., Kasapi, E. (2005), "Computational Determination of Passenger Cars' Braking Distances Equipped with Anti-block Brake Systems", 3rd International Symposium on Highway Geometric Design, June 29– July 1.
- Patte, L. (2002), « Le livre du maître - Justifications de l'ICTAAL – Chap. 2 Visibilité », Sétra, Bagneux.
- Patte, L. (2009), « Évaluation du risque en relation avec la visibilité - Proposition d'indicateurs de risque pour la visibilité », CETE Méditerranée, Aix-en-Provence.
- Sarhan, M., Hassan, Y. (2007), "Three Dimensionnal, Probabilistic Highway Design : Sight Distance Application", TRB 2008 Annual Meeting, Washington.
- Sétra, (1994), « Aménagement des Routes Principales », Circulaire du 5 août.
- Sétra, (2000) « Instruction sur les Conditions Techniques d'Aménagement des Autoroutes de Liaison », Circulaire de la direction des routes du 12 décembre 2000, Bagneux.
- Sétra, Cetur (1992), « Sécurité des routes et des rues », Bagneux.
- UTAC, (2008) « Contrôle technique périodique des véhicules légers. Rapport d'activités annuel. État du parc automobile national. 2007 », Montléry.
- Unifi, TRL, Cete de Lyon (2000), "VERT. Vehicle Road Tyre Interaction: Full Integrated and Physical Model for Handling Behaviour Prediction in Potential Dangerous Situations", Contract N°: BRPR-CT97-0461.

RELATION ENTRE L'ÉVOLUTION DE L'ADHÉRENCE DES REVETEMENTS ROUTIERS ET L'ACCIDENTOLOGIE

Diplômée de l'ENTPE en 2000, docteur en Génie Civil en 2005 de l'école doctorale MEGA (Lyon). Responsable de l'ERA 12 (Équipe de Recherche associée au LCPC) « adhérence, sécurité » au sein de laboratoire régional des ponts et chaussées de Lyon.

Véronique CEREZO
ERA12, Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Lyon
Bron, France

Résumé
Ce papier présente les résultats d'une étude réalisée dans le cadre d'une opération de recherche LCPC nommée « Risques Routiers ». Celle-ci a pour objet la modélisation de l'évolution des caractéristiques de surface de différents revêtements routiers et la détermination de corrélation entre accidents et niveau d'adhérence. L'étude a été réalisée en quatre étapes. Dans un premier temps, une base de données a été constituée à partir de mesures réalisées par différents appareils à grand rendement (AGR) sur le réseau autoroutier et le réseau routier national français au cours de la dernière décennie. Dans un deuxième temps, des tests statistiques ont été réalisés sur cette base de données. Dans un troisième temps, les lois d'évolution obtenues dans le cadre de cette étude sont analysées. Enfin, les lois d'évolution ont été appliquées pour évaluer le niveau de texture au moment de l'accident. Cette valeur corrigée de l'adhérence a ensuite été utilisée dans le calcul des corrélations.

Mots-clés: adhérence, lois d'évolution, CFT, accidents sur chaussée mouillée.

Abstract
This paper presents the results of a research project called "Risques Routiers" funded by LCPC. It aims at modeling the skid resistance evolution and the relationship with the accidents rates on wet surfaces. This study was done in four steps. First, a database was built with infrastructure characteristics measurements (geometry, skid resistance) on high traffic rural roads and some highways. Then, statistical analyses were realized in view of determining the most relevant parameters that can explain skid resistance evolution. In a third step, these evolution laws were analyzed. Lastly, the evolution laws are used to correct skid resistance values and some correlations with accidents rates are done.

Keywords: Skid resistance, Law of evolution, Sideway force coefficient, Accidents on wet surface.

1. Introduction

Le CETE de Lyon a réalisé une étude sur la relation entre le niveau d'adhérence des infrastructures routières et les accidents corporels dans le cadre de l'opération de recherche LCPC « Risques routiers ». En effet, l'adhérence est un des critères rentrant en ligne de compte lorsque les chargés d'études en sécurité routière réalisent un diagnostic d'itinéraires. Or, il n'est pas rare de disposer de données d'adhérence ne correspondant pas à la situation rencontrée par l'usager lors d'un accident. C'est pourquoi un travail de modélisation de l'évolution de l'adhérence des revêtements routiers a été mené dans un premier temps. Les travaux se sont déroulés en trois temps. Dans une première partie, une base de données a été constituée suivant des critères spécifiques et une analyse statistique a permis de définir les données explicatives permettant de modéliser l'évolution du niveau d'adhérence. Dans une deuxième partie, différents types de lois d'évolution sont proposés. Dans une troisième partie, le niveau d'adhérence est corrigé à l'aide des lois d'évolution et corrélé avec les accidents corporels constatés sur les itinéraires considérés.

2. Constitution de la base de données

2.1 Sélection de l'échantillon

Les itinéraires ont été sélectionnés en régions Rhône-Alpes, Normandie et en île de France. L'étude s'est concentrée sur des VRU (voies rapides urbaines), des autoroutes non concédées ou des routes nationales de type 2*2 voies, compte tenu du fait que ce type de réseau constitue une part importante du réseau non transféré aux collectivités locales. Les itinéraires retenus devaient respecter les critères suivants :

- Présence de trois mesures d'adhérence successives au minimum,
- Connaissance du trafic, de l'âge et du type de revêtements,
- Disponibilité des données géométriques.

2.2 Caractéristiques de la base

La base est constituée de 950 km de données, mesurées au pas de 20 m, répartis sur 19 itinéraires.

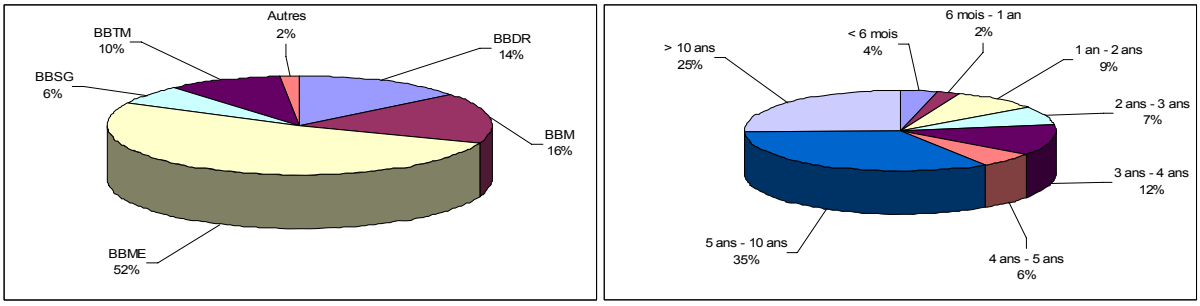


Figure 1 – Nature des revêtements (1a) et âge des revêtements (1b) considérés dans la base

La base contient 5 familles de revêtements bitumineux (BBSG[1], BBTM[2], BBM[3], BBME[4] et BBDr[5]) représentant 98% des données (Figure 1). Les 2% contenus dans l'item « Autres » correspondent principalement à des enduits superficiels.

[1] Béton Bitumineux Semi-Grenu
[2] Béton Bitumineux Très Mince
[3] Béton Bitumineux Mince
[4] Béton Bitumineux à Module Élevé
[5] Béton Bitumineux Drainant

Le regroupement des revêtements par classes d'âge montre que la moitié des revêtements de la base a plus de 5 ans et un quart a plus de 10 ans. Ce résultat s'explique par le mode de sélection des itinéraires sur lesquels il fallait au moins trois mesures de CFT, sachant que la plupart de ces mesures sont réalisées dans le cadre de l'IQRN (Indicé de Qualité de routes Nationales) avec une fréquence moyenne de passage de 3 ans.

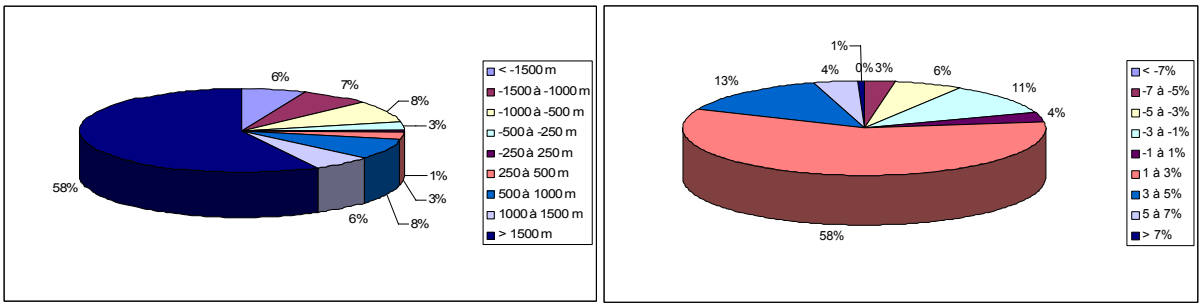


Figure 2 – Répartition par classes de rayons de courbures (2a) et dévers (2b)

La répartition des données de la base par classes de rayon de courbure montre que plus de la moitié des données correspondent à des zones de grandes courbes (rayon > 1500 m) ou des lignes droites (Figure 2). Ce résultat est cohérent avec le type de réseau routier considéré. De même, plus de la moitié des valeurs de dévers est comprise entre 1 et 3%. Ce résultat est cohérent avec les valeurs de rayon observées puisque le dévers doit être de l'ordre de 2,5% en ligne droite (ICTAVRU, Figure 3). Enfin, un tiers de la base se situe sur des zones plates (-1 à 1%) et un tiers se situe en montée (1 à 5%).

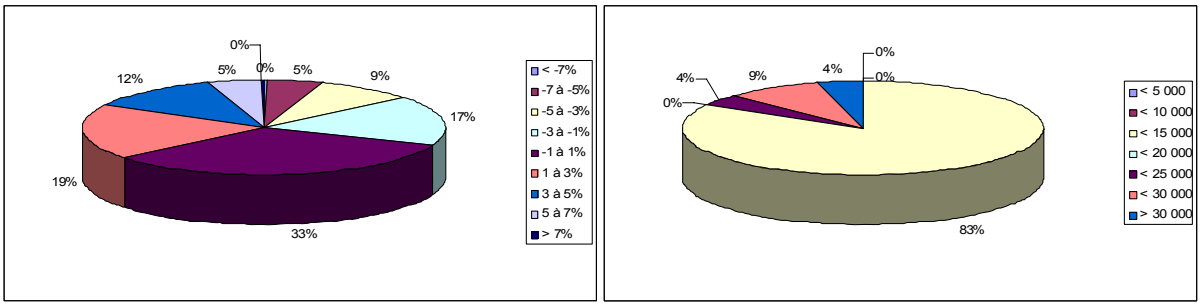


Figure 3 – Répartition par classes de pente longitudinale (3a) et de TMJA [6] en veh/j (3b)

L'adhérence des revêtements est évaluée à l'aide d'une mesure de frottement (Coefficient de Frottement Transversal) réalisé par l'appareil SCRIM et d'une mesure profilométrique (Profondeur Moyenne de Profil) réalisée par le RUGO. La répartition des valeurs de CFT et de PMP est indiquée dans les figures 4a et 4b. On observe que 54% des valeurs de CFT sont inférieures à 0,60 ce qui traduit une adhérence médiocre pouvant présenter un risque. Le reste de la base correspond à des valeurs de CFT comprises entre 0,60 et 0,80. Il n'y a pas de zones de très forte adhérence correspondant à des techniques particulières comme des enrobés à base de bauxite calcinée par exemple. La valeur moyenne de CFT est de 0,59 avec un écart-type de 0,08.

La valeur moyenne de PMP est de 0,94 mm avec un écart-type de 0,38 mm. Les valeurs de macrotexture se répartissent sur une gamme assez étendue. Plus des trois quarts des valeurs sont supérieures à 0,80 mm. Cette valeur correspond à la valeur limite en réception de couche de

[6] Trafic Moyen Journalier Annuel

roulement neuve proposée par la circulaire. Les entreprises routières ont tendance à mettre en place des revêtements ayant une macrotexture plus élevée afin d'éviter tout risque de contentieux, ce qui explique que les valeurs de la base restent relativement hautes après plusieurs années de mise en service.

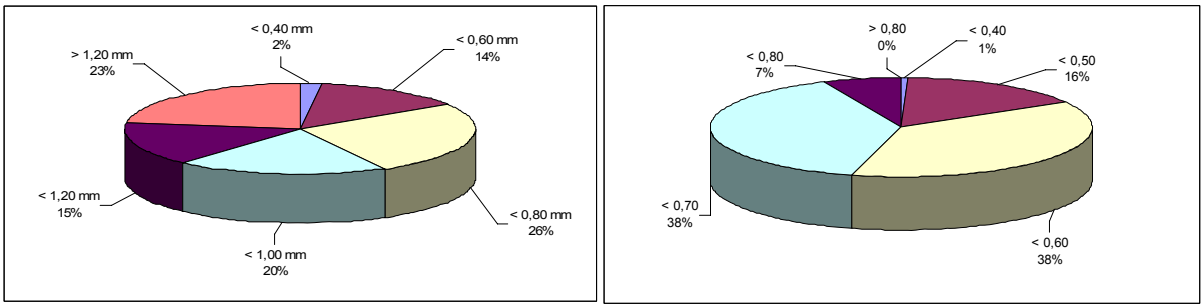


Figure 4 – Répartition par classes de PMP (4a) et de CFT (4b)

3. Analyses statistiques

Trois types d'analyses statistiques ont été menés su cette base, à savoir :

- Une analyse en composantes principales (ACP),
- Une analyse de la variance (ANOVA),
- Une vérification de la normalité de l'échantillon.

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une méthode d'analyse des données, qui consiste à transformer des variables liées entre elles (dites "corrélées" en statistique) en nouvelles variables indépendantes les unes des autres (donc "non corrélées"). L'ACP permet d'analyser de données quantitatives (continues ou discrètes). Ces nouvelles variables sont nommées "composantes principales" ou axes. L'ACP permet au praticien de réduire l'information en un nombre de composantes plus limité que le nombre initial de variables. L'ACP réalisée dans le cadre de ces travaux est celle de Pearson, ce qui signifie que les calculs statistiques seront basés sur une matrice composée des coefficients de corrélation de Pearson. Le coefficient de corrélation de Pearson est le rapport de la covariance et du produit des écart-types des deux variables. Sa valeur est comprise entre -1 et 1.

Tableau 1 - Définition des composantes principales (coefficients de Pearson).

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
PENTE	0,142	**0,606**	0,316	**0,699**	0,152	0,007
RAYON	**0,810**	-0,078	0,067	-0,107	0,168	**-0,542**
DEVERS	**0,815**	0,051	0,051	-0,163	-0,012	**0,551**
TMJA	-0,073	0,320	**0,729**	-0,354	-0,477	-0,086
AGE	-0,182	-0,431	**0,664**	-0,063	**0,571**	0,102
PMP	-0,171	**0,697**	-0,195	-0,485	0,460	-0,006

Le tableau 1 indique la composition des axes principaux. Le premier axe F1 dépend du rayon et du dévers (qui sont fortement corrélés étant donné que les règles de conception routière préconisent des valeurs de dévers pour différentes valeurs de rayon de courbure) et permettent d'expliquer 30% des variations de CFT. Le second axe F2 dépend de la pente et de la macrotexture et le cumul des axes F1 et F2 permet d'expliquer 50% environ des variations de CFT (Figure 5). De plus, la figure 5 montre qu'il est nécessaire de prendre en compte 5 axes au moins afin d'expliquer 90% des variations, ce qui laisse à penser que des modèles simples d'évolution (i.e. à 1 ou 2 paramètres) ne permettront pas d'avoir une bonne prédiction du CFT.

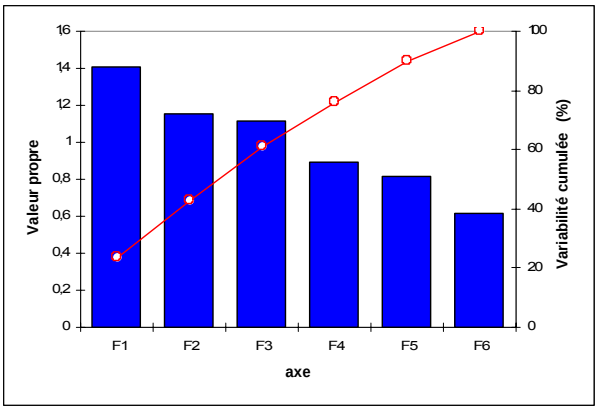


Figure 5 – Pourcentages de variations expliqués par les axes principaux

Ensuite, les analyses de variance (ANOVA) ou analyses factorielles sont des techniques permettant de savoir si une ou plusieurs variables dépendantes (appelées aussi variables endogènes ou variables à expliquer) sont en relation avec une ou plusieurs variables dites indépendantes (ou variables exogènes ou variables explicatives). Lorsqu'il n'y a qu'une seule variable à expliquer, et une ou plusieurs variables explicatives, toutes continues, on fait appel au modèle de régression linéaire simple ou multiple. On appelle « régresseurs » les variables explicatives. Lorsque certaines des variables explicatives sont discrètes (discontinues), et d'autres continues, on réalise une analyse de la covariance. Le modèle se compose donc à la fois de facteurs et de régresseurs. De plus, ces analyses de variance permettent d'évaluer le niveau d'information apporté par une variable explicative dans le modèle de régression.

Il ressort de ces analyses que les lois d'évolution doivent être calculées par type de revêtement et qu'il est nécessaire de prendre en compte tous les paramètres proposés à savoir le rayon de courbure, la pente, le dévers, la macrotexture, le TMJA et l'âge. De plus, l'idée d'utiliser le trafic cumulé a été abandonnée car cela entraînait une perte d'information dans la modélisation en éliminant le paramètre âge et donc en masquant le phénomène de vieillissement de l'enrobé qui se produit simultanément avec le polissage du au trafic.

4. Lois d'évolution de l'adhérence

Dans un premier temps, des lois de régressions à une seule variable ont été proposées en considérant l'âge du revêtement, le TMJA et le trafic cumulé. Ces lois ont été testées car elles sont faciles à mettre en œuvre pour un gestionnaire. L'objectif était d'évaluer la représentativité de ce type de modèle. Des régressions linéaires et des régressions logarithmiques sont testées. Quelques relations sont proposées ci-dessous (Tableau2). Elles corroborent des études antérieures (Lorino et al., 2006) (Lorino et al., 2008).

Dans un second temps, des modèles basés sur des régressions linéaires multiples sont proposés (Tableau 3). On observe que les coefficients de la loi d'évolution des enrobés drainants diffèrent fortement de celle des autres enrobés. De plus les coefficients d'ajustement sont faibles mais leur significativité a été vérifiée à l'aide du test du F.

Tableau 2 - Lois de régressions logarithmiques en fonction de l'âge pour différents types de revêtements.

Revêtement	CFT	Coefficient de régression (R^2)
BBM	-7.03*LN(age)+90.26	0.50
BBTM	-2.59*LN(age)+76.94	0.43
BBSG	-4.48*LN(age)+78.36	0.24
BBME	-1.28*LN(age)+58.66	0.13
BBDr	-1.61*LN(age)+68.78	0.09

Tableau 3 - Lois de régressions linéaires multiples.

	Constante	AGE (années)	PMP (mm)	PENTE (%)	RAYON (m)	DEVERS (%)	TMJA (veh./j)	R^2
BBTM	55,7	-0,35	5,6	-0,041	0,00055	-0,074	0,0000085	0,14
BBSG	55,8	-0,35	5,5	-0,041	0,00053	-0,084	0,0000068	0,13
BBME	55,8	-0,35	5,5	-0,041	0,00053	-0,083	0,0000068	0,13
BBM	55,7	-0,35	5,6	-0,043	0,00055	-0,07	0,0000078	0,14
BBDr	56,2	-0,35	6,8	0,027	0,00025	-0,018	0,000011	0,16

5. Corrélation avec l'accidentologie

Les accidents ont des causes multiples. Ils se produisent lorsque le comportement de l'usager devient inadapté à son environnement extérieur compte tenu des caractéristiques de son véhicule. Cette étude étant axée sur le rôle de l'adhérence, seuls les accidents se produisant sur chaussée mouillée ont été pris en compte. Les corrélations ont été calculées en considérant le taux d'accidents τ_{acc} qui est un indicateur donnant un nombre moyen d'accidents sur un itinéraire :

$$\tau_{acc} = \frac{n_{acc}}{n_{veh}\,\Delta t.L} \times 10^8$$

avec n_{acc} : nombre total d'accidents s'étant produit pendant la période d'observation,
$n_{véh}$: nombre quotidien de véhicules (moyenne annuelle),
L : longueur de la chaussée étudiée (km),
Δt : période d'observation (jours).

Les travaux de corrélation se sont déroulés en deux temps. Dans un premier temps, les taux d'accidents sur chaussées mouillées ont été corrélées à des valeurs moyennes de « CFT non corrigées ». Chaque section sur laquelle un accident s'était produit, s'est vue attribuer la valeur de CFT mesurée la plus proche. Dans un second temps, quelques lois de corrélation déterminées dans l'étude ont été utilisées de façon à corriger les valeurs de CFT en évaluant le niveau de CFT au moment où l'accident s'était produit. De plus, les données ont été agrégées de façon à calculer des taux d'accidents pour des classes de CFT définies avec un pas de 0,10. On obtient ainsi des graphiques du type de ceux représentés sur la figure 6.

La figure 6 représente la variation du taux d'accidents sur chaussées humides sur des voies rapides (autoroutes non concédées et voies rapides urbaines) en Normandie entre 1999 et 2005. Les itinéraires considérés présentent des TMJA supérieurs à 30 000 veh./j.

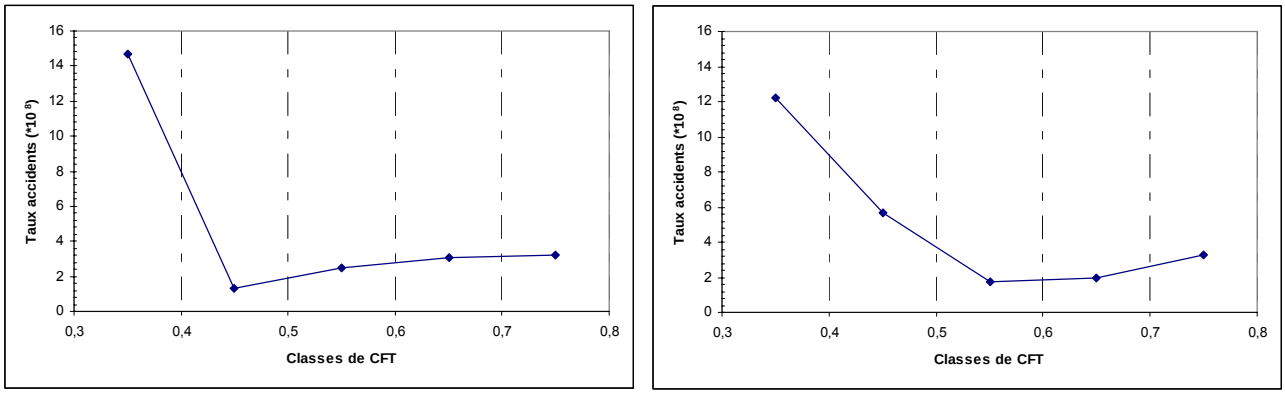


Figure 6 – Taux d'accidents sur « voies rapides » dans la région Normandie en fonction de la classe de CFT non corrigée (6a) et de la classe de CFT corrigée (6b)

Tout d'abord, on note que la correction des valeurs de CFT permet d'infléchir la courbe et de retrouver une évolution plus proche de celle présentée dans (Durand, 2009). Ensuite, les taux d'accidents sont multipliés par deux lorsque le niveau de CFT devient inférieur à 0,50 et ils quadruplent lorsque le CFT devient inférieur à 0,40. Des résultats équivalents sont obtenus sur les itinéraires de Rhône-Alpes et d'Île de France (Cerezo et al., 2009). Il semble donc que des valeurs de 0,40 (seuil critique) et de 0,50 (seuil de surveillance) soient appropriées dans le cadre d'une politique d'entretien.

6. Conclusions

Ce papier présente quelques résultats de l'étude (Cerezo et al., 2009). Il permet de valider la démarche utilisée et de montrer l'intérêt d'une correction du CFT avant corrélation avec des données d'accidentologie.

Cette étude permet de valider le fait que les lois d'évolution doivent être calculées par famille de techniques routières. Les variables explicatives de l'évolution du CFT sont le rayon, le dévers, la pente, l'âge et le trafic (TMJA). Ils permettent d'expliquer plus de 80% des variations de CFT. De plus, un modèle basé sur des régressions linéaires multiples est proposé avec un coefficient R^2 de l'ordre de 0,14. Ce coefficient est faible mais il reste significatif compte tenu de l'échantillon testé. Enfin, les corrélations entre CFT et taux d'accidents sur chaussées mouillées mettent en évidence deux valeurs seuils : 0,50 et 0,40 en dessous desquelles les taux d'accidents sont multipliés par deux et par quatre. Ces valeurs pourraient être utilisées comme seuil d'alerte et seuil critique par les gestionnaires.

Références

- Cerezo, V. (2009), « Synthèse bibliographique évolution de l'adhérence et lien avec l'accidentologie » », rapport de recherche, Opération de recherche 11K081 « Risques Routiers », 61 p.
- Cerezo, V. Drure, J.P. Jacques, V. (2009), « Lois d'évolution de l'adhérence et lien avec l'accidentologie » », rapport de recherche, Opération de recherche 11K081 « Risques Routiers », 100 p.
- Durand, J.F. (2009), « Risque d'accidents et caractéristiques des chaussées sur le réseau routier national », rapport de recherche, Opération de recherche 11N066 « Optimisation de l'entretien des chaussées », 120 p.

- Gothié, M. (2002), "Skid resistance evolution of different wearing course techniques according to traffic", in Proc. IXth Int. Conf. of Asphalt Pavements, Copenhagen, Denmark, 17-22 August.
- Lorino, T. Lepert, P. et Riouall, A. (2006), « Application à la campagne IQRN des méthodes statistiques d'analyse de l'évolution des chaussées », Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées, vol.261-262, pp.25-41.
- Lorino, T. Lepert, Ph. Giacobi, C. and Layerle, E. (2008), "Pavement surface characteristics evolution", in Proc. VIth International Symposium "SURF 2008" on pavement surface characteristics, Portoroz, Slovenia, 19-22 October.

DETERMINATION DES VITESSES LIMITES DE PERTE DE STABILITE DES POIDS LOURDS EN VIRAGE

Diplômée de l'Institut de Génie Mécanique-Université de Blida (Algérie) en 2000, docteur en Automatique/Robotique en 2005 sur la dynamique des poids lourds et de leur sécurité. Chercheur au laboratoire régional des ponts et chaussées de Lyon (ERA 12).

Diplômée de l'ENTPE en 2000, docteur en Génie Civil en 2005 de l'école doctorale MEGA (Lyon). Responsable de l'ERA 12 (Équipe de Recherche associée au LCPC) « adhérence, sécurité » au sein de laboratoire régional des ponts et chaussées de Lyon.

Mohamed BOUTELDJA **Véronique CEREZO**

ERA12, Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Lyon
Bron, France

Résumé

Les travaux présentés dans cet article sont réalisés dans le cadre de l'opération de recherche PLINFRA du LCPC, sur la sécurité des poids lourds et des infrastructures. Elle vise principalement à alerter les gestionnaires de la route sur la dangerosité de certaines configurations de l'infrastructure. Elle permet également de fournir une prédiction aux conducteurs de poids lourds sur la vitesse limite à ne pas dépasser afin de rester dans le domaine de stabilité. Ces vitesses limites sont déterminées à partir de l'évaluation de l'interaction entre la dynamique de poids lourd, l'infrastructure et les actions conducteur, ainsi que les caractéristiques et les occurrences d'accident en virage (dérapage, renversement ou mise en portefeuille). Des abaques de vitesses limites sont établis en fonction des caractéristiques de l'infrastructure et des actions conducteur. Une analyse comparative entre les vitesses calculées et mesurées sur des virages réels (V_{85}) sera présentée. Elle permettra de caractériser un risque d'accident en courbes.

Mots-clés: Poids lourd, perte de contrôle, détection, prédiction, sécurité routière, simulation, vitesse maximale.

Abstract

This paper presents some results obtained in a research project called PLINFRA and funded by the LCPC. This project aims at warning road managers about dangerous configurations of infrastructure. Moreover, a method of prediction of maximum speed for heavy vehicles is proposed. These thresholds values are calculated by considering heavy vehicles dynamics and road characteristics. Abacuses of speed are obtained for various infrastructure characteristics (radius of curvature, crossfall, skid resistance). A comparison between safety speeds and the values of V_{85}, which represent the real speed under which 85% of heavy vehicles are driving, is presented. The gap between these two values allow evaluating the risk in curves.

Keywords: Heavy Vehicle, Loss of control, Detection, Prediction, Road Safety, Simulation, Speed limit.

1. Introduction

Les accidents routiers impliquant les poids lourds sont largement médiatisés compte tenu de leur aspect spectaculaire, de leur coût en vies humaines et en matériel, ainsi que de leurs conséquences indirectes liées au trafic (congestions, routes coupées etc.) et à l'environnement (déversement de produits toxiques etc.). Les statistiques montrent que les véhicules articulés de type tracteur semi-remorque représentent plus de 55% du trafic de poids lourds en France.

Dans certaines cas, ce type de poids lourds peut présenter des comportements instables en virage, traduit par des risques élevés d'accidents (Bouteldja,2005), (Bouteldja et Cerezo, 2009). Le renversement se produit lorsque le centre de gravité est élevé tandis que la mise en portefeuille s'explique par une mauvaise distribution de l'adhérence entre le tracteur et la semi-remorque. Selon des études récemment publiées sur l'accidentologie (Dupré, 2002), (ONISR, 2003-2005), les accidents en virages semblent principalement dus à des erreurs d'appréciation de la vitesse du véhicule de la part des conducteurs (sur des trajets habituels par exemple) et/ou des gestionnaires de l'infrastructure (mauvaise, etc.).

Si les systèmes de sécurité passifs et actifs sont en plein essor dans le monde des poids lourds, il reste que leur champ d'actions est limité. En effet, la majorité des systèmes de sécurité sont des systèmes embarqués tenant uniquement compte de la dynamique du véhicule. Actuellement, un seul système, développé et commercialisé par Chrysler, alerte le conducteur en cas de vitesse excessive à l'approche d'un virage. Néanmoins, seules des données quasi-statiques sont prises en compte par ce système, ce qui rend l'alerte contestable et incertaine. Récemment, une nouvelle technique développée par (Glaser, 2004) et (Glaser et al., 2008) vise à calculer des profils de vitesses en accord avec la dynamique du véhicule, les actions conducteur et les caractéristiques géométriques de l'infrastructure. Cependant, elle n'a été appliquée qu'aux véhicules légers.

L'approche proposée ici vise à vérifier l'adéquation entre les vitesses légales et les vitesses limites pour les poids lourds dans différentes configurations de l'infrastructure. Elle propose en outre une vitesse maximale aux conducteurs de poids lourds pour rester en stabilité. Les vitesses optimales ou limites de perte de contrôle sont déterminées à partir d'une évaluation dynamique des mouvements des véhicules articulés en virage, tenant compte des caractéristi-ques géométriques et physiques de l'infrastructure, qui permet de décrire un ou plusieurs risques d'accidents. Les risques considérés sont le renversement et le dérapage des tracteurs et semi-remorques. Après une analyse simpliste de la perte de contrôle en virage, une méthode de détermination de la vitesse limite est introduite. Une analyse comparative entre les vitesses obtenues par cette méthode et celles mesurées sur des virages réels (V_{85}) est présentée. Enfin, une prédiction des vitesses limites de renversement ou de dérapage en virage des véhicules articulés en fonction des caractéristiques de l'infrastructure est proposée.

2. Position du problème

2.1 Cadre général

Les poids lourds, mono-corps (porteur) ou articulés (tracteur semi-remorque) ont des possibilités dynamiques d'évolution notablement inférieures à celles des véhicules légers, principalement pour des raisons d'architecture et de masse. De plus, les excès de vitesses tendent à aggraver les accidents de poids lourds de part les transferts d'énergie cinétique qui en résultent lors de chocs.

Une vitesse excessive est définie comme une vitesse supérieure à la vitesse limite légale, régulièrement affichée sur les panneaux de signalisation. En effet, les vitesses élevées réduisent la possibilité de répondre à temps à des situations de conduite défavorables, ce qui se traduit souvent par une augmentation de la distance d'arrêt, ainsi que l'impossibilité d'éviter les situations à risque (manœuvres d'évitement avant accident).

Par ailleurs, les vitesses légales sont généralement déterminées à partir d'une configuration donnée de l'infrastructure, d'un conducteur et d'un véhicule type (moyen). Or, plusieurs catégories de conducteurs et de véhicules circulent sur la route, et des variations parfois considérables dans le temps des caractéristiques de l'infrastructure (adhérence, travaux,…) sont observables. L'existence des modèles standards définissant les vitesses légales peuvent ainsi favoriser certains types de véhicules et en même temps en pénaliser d'autres. Cependant, afficher plusieurs vitesses légales pour chaque type de véhicules ou de conducteurs est à la fois délicat et coûteux pour les gestionnaires et perturbateur pour les conducteurs.

2.2 Spécificité de l'étude

Plusieurs méthodes permettant de déterminer les vitesses limites en virage. Parmi celles-ci, on trouve des méthodes dites « conceptuelles » visant à aider les concepteurs routiers dans le choix des séquences de tracé en plan limitant les variations de vitesses pratiquées le long d'un itinéraire. D'autres méthodes dites « dimensionnelles » sont basées sur des modèles traduisant les relations entre vitesse, courbure et dévers afin de mieux dimensionner les rayons et les dévers des routes (SETRA). L'élaboration de ces instructions de dimensionnement a permis de déterminer l'accélération transversale limite de sécurité :

$$a_{lat_\lim} = g\left(\mu_{lat}\cos\varphi + \varphi\right) \tag{1}$$

et de donner une expression de vitesse limite égale à :

$$V_{\lim} = \sqrt{Rg\left(\mu_{lat}\cos\varphi + \varphi\right)} \tag{2}$$

où g est la gravité, R rayon de courbure de virage. μ_{lat} et φ sont respectivement l'adhérence latérale mobilisée et le dévers de la route.

Toutefois, les calculs de vitesses limites en courbes basés sur des modèles dynamiques semblent les plus prometteurs. Ces méthodes sont basées sur des modèles mathématiques intégrant le comportement dynamique du véhicule en interaction avec son environnement. Certaines d'entre elles s'appuient sur une localisation à l'aide d'un GPS sur une carte numérique embarquée dans le véhicule. D'autres sont intégrées dans un système de contrôle/commande et d'assistance à la conduite (Glaser, 2008), (Varhelyi, 2000). Néanmoins, ces différentes méthodes sont développées pour les véhicules légers et elles ne permettent pas de solutionner les problèmes de vitesses mal adaptées pour les véhicules lourds articulés.

Enfin, (Baker et al., 2000) ont développé une application basée sur l'estimation du poids et de la vitesse des poids lourds par un système de pesage installé en amont d'un virage afin de prédire les risques de renversement en courbe. Néanmoins, la prise en compte des caractéristiques physiques de l'infrastructure et de la dynamique de véhicule est encore insuffisante, ce qui peut entraîner des erreurs de prédiction de la vitesse limite. Ainsi, cette méthode se limite à un type de risque (renversement) sur un virage donné, omettant par exemple le risque de dérapage ou de mise en portefeuille pour les véhicules articulés.

3. Détermination de la vitesse limite

3.1 Modélisation du véhicule

Les expressions des vitesses limites en virage d'un véhicule articulé sont déterminées à partir d'un modèle simplifié de type bicyclette étendu, qui s'intéressera essentiellement à la dynamique transversale (Figure 1).

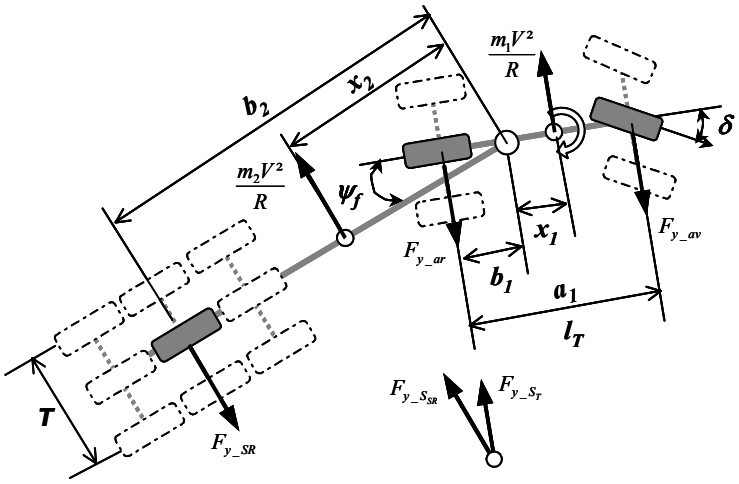


Figure 1 – Paramètres et symboles utilisés dans le modèle et les forces durant la mise en virage du véhicule

Les hypothèses suivantes sont réalisées :

- le tracteur et la semi-remorque sont considérés comme étant deux corps rigides,
- la vitesse du tracteur est considérée constante le long du virage,
- les mouvements angulaires du tracteur ψ_T, de la semi-remorque ψ_{SR} et l'angle de l'articulation ψ_f entre ces deux corps sont petits et vérifient la relation $\psi_f = \int(\dot{\psi}_{SR} - \dot{\psi}_T)dt \approx \psi_{SR} - \psi_T$,
- les trois essieux (tridem) de la semi-remorque sont combinés en un seul essieu localisé à leur centre géométrique,
- les deux roues d'un même essieu sont représentées par une seule roue au centre d'essieu.

De plus, les dimensions sont définies par rapport au point d'attelage entre le tracteur et semi-remorque (sellette). Ainsi, à l'équilibre, les différentes forces et moments latéraux de chaque corps peuvent être calculés indépendamment.

Pour la semi-remorque, les forces latérales au niveau du tridem et du point d'attelage sont exprimées par les deux relations suivantes :

$$F_{y_SR} = \left(m_2 \frac{V_x^2}{R} \right) \frac{x_2}{b_2}$$
$$F_{y_S_{SR}} = m_2 \frac{V_x^2}{R} - F_{y_SR} = m_2 \left(1 - \frac{x_2}{b_2} \right) \frac{V_x^2}{R} \quad (3)$$

Cette force interne transmise au tracteur doit vérifier l'égalité suivante $F_{y_S_T} = -F_{y_S_{SR}} \cos\varphi$.

De même pour le tracteur, les forces latérales au niveau de l'essieu avant et arrière du tracteur sont données par :

$$\begin{cases} F_{y_av} = m_1 \dfrac{V_x^2}{R} - F_{y_ar} - F_{y_S_T} \\ F_{y_ar} = \dfrac{\left(m_1 \dfrac{V_x^2}{R}(a_1 - x_1) - F_{y_S_T} a_1 \right)}{(a_1 + b_1)} \end{cases} \quad (5)$$

L'application de seconde loi de la mécanique permet de décrire les équations de mouvements par rapport au point d'attelage :

$$\begin{vmatrix} m\left(\dot{V}_{y_T} + V_{x_T}\dot{\psi}_T\right) + m_T x_1 \ddot{\psi}_T - m_{SR} x_2 \ddot{\psi}_{SR} = F_{y_av} + F_{y_ar} + F_{y_SR} \\ I_{z_T}\ddot{\psi}_T + m_T x_1 \left(\dot{V}_{y_T} + V_{x_T}\dot{\psi}_T\right) = a_1 F_{y_av} - b_1 F_{y_ar} \\ I_{z_SR}\ddot{\psi}_{SR} + m_{SR} x_2 \left(\dot{V}_{y_T} + V_{x_T}\dot{\psi}_T\right) = -b_2 F_{y_SR} \end{vmatrix} \quad (6)$$

avec m_T et m_{SR} représentant les masses suspendues du tracteur et de la semi-remorque. V_{x_T}, V_{y_T}, V_{y_SR}, $\ddot{\psi}_T$ et $\ddot{\psi}_{SR}$ sont respectivement les vitesses longitudinales, latérales et angulaires de lacet du tracteur et de la semi-remorque. $\dot{V}_{y_T}$, $\dot{V}_{y_SR}$, $\ddot{\psi}_T$ *et* $\ddot{\psi}_{SR}$ sont les accélérations latérales et angulaires de lacet des deux corps.

Le modèle bicyclette (6) présente la dynamique latérale du véhicule articulé. Ce modèle peut être étendu et complété par la dynamique de roulis. Deux masses suspendues sont attachées aux châssis du tracteur et de la semi-remorque par le biais de la suspension. L'axe de roulis est supposé être à une distance constante, parallèlement à l'axe longitudinal de chaque corps. Le centre de gravité de chaque corps est à une hauteur h_T et h_{SR} au-dessus de l'axe de roulis. ϕ_i, $\dot{\phi}_i$ et $\ddot{\phi}_i$ (i=*T, SR*) sont respectivement l'angle, la vitesse et l'accélération de roulis des masses suspendues. Les coefficients d'amortissement et de raideur anti-roulis sont D_{ϕ_i} et K_{ϕ_i}.
Afin d'assurer la simplicité et en même temps la représentativité de la dynamique de roulis, les équations de mouvements de roulis du tracteur et de la semi-remorque sont découplées.

Enfin, les charges verticales exercées par chaque essieu peuvent être exprimées aussi par :

$$\begin{aligned} F_{z_av} &= \frac{m_T g(a_1 + x_1)}{(a_1 + b_1)} + \frac{m_{SR} g(b_2 - x_2) a_1}{(a_1 + b_1) b_2} \\ F_{z_ar} &= \frac{m_{SR} g(b_1 + x_1)}{(a_1 + b_1)} + \frac{m_{SR} g(b_2 - x_2) b_1}{(a_1 + b_1) b_2} \\ F_{z_SR} &= \frac{m_{SR} g x_2}{b_2} \end{aligned} \quad (7)$$

3.2 Détermination des vitesses limites

Un poids lourd circulant dans un virage est poussé vers l'extérieur de la route par l'effet de la force centrifuge. Cette force est contrebalancée par les forces latérales dues au contact pneu/chaussée ainsi que par le dévers (Figure 2).

Par ailleurs, la relation entre la force transversale Fy et la force verticale Fz au point de contact pneu/chaussée, peut être définie en fonction du frottement de Coulomb. Ce choix a été dicté par le fait que la modélisation s'intéresse aux limites de dérapage et de renversement en utilisant une approche simplifiée basée par des équations d'équilibre des forces et des moments :

$$\mu_{disp} = \frac{F_y}{F_z} \leq \mu_{\max} \tag{8}$$

où μ_{max} est le frottement transversal maximal.

Considérons un tracteur semi-remorque dans un virage de dévers φ (φ est petit, au plus de 7%), de rayon R, roulant à la vitesse Vx. On suppose que la surface de roulement est plane et qu'elle n'entraîne pas de phénomène de pompage. Chaque essieu du poids lourd est soumis aux forces suivantes :

- à un poids *P* correspondant à son propre poids et à une fraction de celui du tracteur et de la semi-remorque,
- aux réactions normales du sol sous chaque roue,
- aux réactions transversales du sol qui retiennent les roues en équilibre,
- et à la force centrifuge.

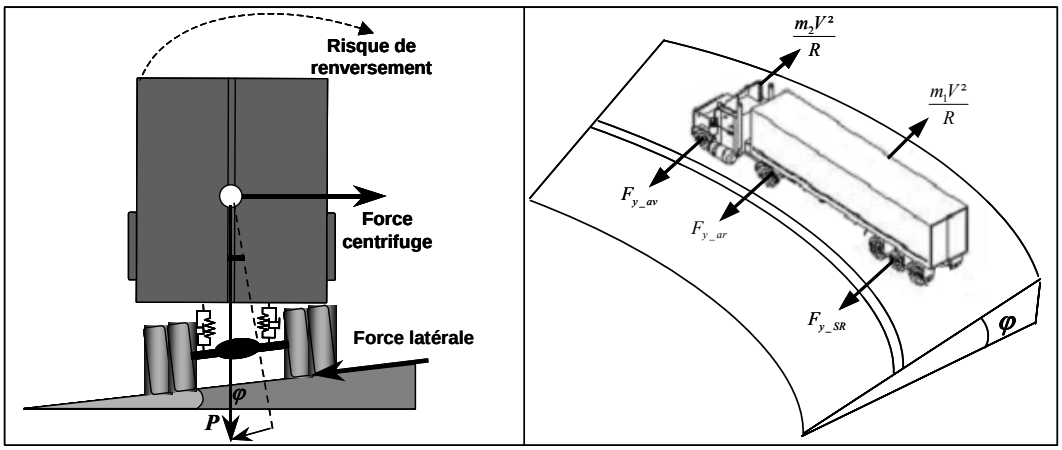


Figure 2 – Force agissant sur un véhicule articulé en virage

Vitesse limite de dérapage

Quand le dérapage a lieu, l'équilibre transversal n'est plus garanti. La force centrifuge devient prépondérante. Par rapport à un système de cordonnée lié au point de liaison entre le tracteur et la semi-remorque, on a donc :

$$\left(F_{y_av} + F_{y_ar} + F_{y_SR}\cos\psi_f\right)\cos\varphi < \left(F_{C_T} + F_{C_SR}\cos\psi_f\right)\cos\varphi - \left(P_1 + P_2\right)\sin\varphi \tag{9}$$

En tenant compte des développements précédents et en posant $\tan(\varphi) = \varphi$, on obtient la vitesse limite de dérapage d'un véhicule articulé:

$$V_{x_\max_MP} = \sqrt{127R\,\frac{\mu_{\max}\left(Am_1 + Bm_2\right) + 127\left(m_1 + m_2\right)\varphi}{\left(m_1 + m_2\cos\psi_f\right)}} \tag{10}$$

Vitesse limite de renversement

Les études cinématiques sur des véhicules articulés concluent que l'augmentation linéaire des angles de dérive des trains de la semi-remorque induit une poussée latérale plus forte. En conséquence, le train le plus en arrière de la semi-remorque a tendance à décoller en premier. Donc, le renversement des véhicules articulés correspond au déséquilibre en rotation de l'unité tractée.

On suppose que l'ensemble tracteur/semi-remorque se renverse simultanément, c'est-à-dire qu'on néglige l'effet des ressorts des suspensions qui retiennent les roues en contact avec la route. Le moment créé par la force centrifuge (de la semi-remorque et celle générée par le tracteur au niveau de la sellette) par rapport au point de contact pneu/chaussée restant est alors supérieur à celui créé par le poids de la semi-remorque, ce qui se traduit par :

$$\left(F_{C_2}h_{SR} - F_{C_1}h_S\cos\psi_f\right)\cos\varphi > \left(P_2\frac{T}{2} + \left(P_2\frac{b_2 - x_2}{b_2}\right)\frac{T}{2}\right)\sin\varphi \qquad (11)$$

où h_S est la hauteur de la sellette.

On en déduit la vitesse limite de renversement :

$$V_{x_\max_R} = \sqrt{127R\frac{m_2T\left(1 + \frac{b_2 - x_2}{b_2}\right)\varphi}{2\left(m_2h_{SR} - m_1h_S\cos\psi_f\right)}} \qquad (12)$$

Enfin, la vitesse maximale limite en cas de risque d'accident des véhicules articulés est :

$$V_{\max} = Sup\left(V_{x_\max_MP}, V_{x_\max_R}\right) \qquad (13)$$

4. Application

Des courbes exprimant la vitesse limite en fonction du rayon, du dévers et de l'adhérence, issues pour la plupart de la littérature (théorique), ont été simulées dans le cadre de ces travaux. Deux séries d'ajustements ont été réalisées. La première série a permis de préparer les paramètres et les données de simulation (angle de braquage, caractéristiques de l'infrastructure etc.). La seconde concerne la programmation du dispositif de calcul de la vitesse limite en virage sur un émulateur de la dynamique du véhicule articulé.

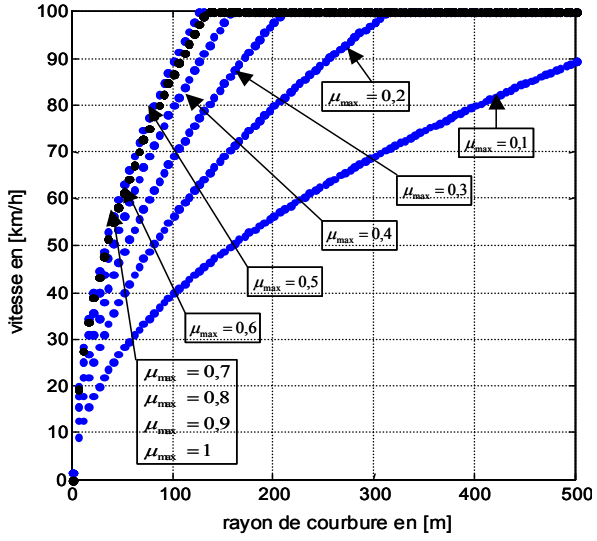


Figure 3 – V_{max} pour différentes valeurs d'adhérence et de rayon de courbure

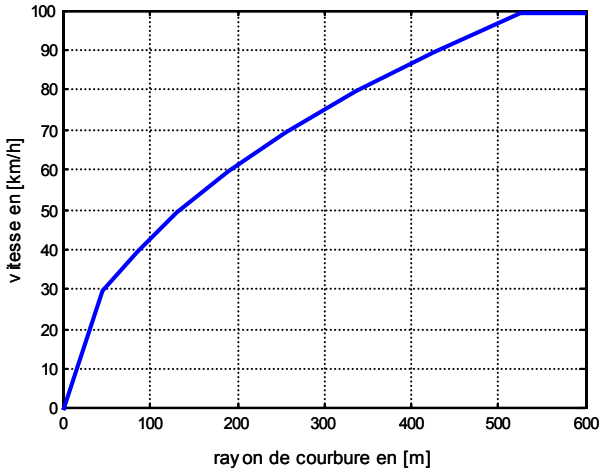


Figure 4 – V_{max} en fonction du rayon de courbure (dévers=2%, μ=0,2 et γ_{lat}=0,15g)

Les figures 3 à 8 illustrent les vitesses limites obtenues à partir des équations (10) et (12). Ces vitesses sont calculées sur des virages présentant des rayons variant entre 0 et 600 m et un coefficient de frottement variant entre 0 et 1. Quatre valeurs de dévers sont considérées : 2, 4, 6 et 8%. Les courbes de vitesse longitudinale V_x du véhicule ont été plafonnées à 150 km/h, vitesse nettement supérieure à la vitesse réelle d'un poids lourd.

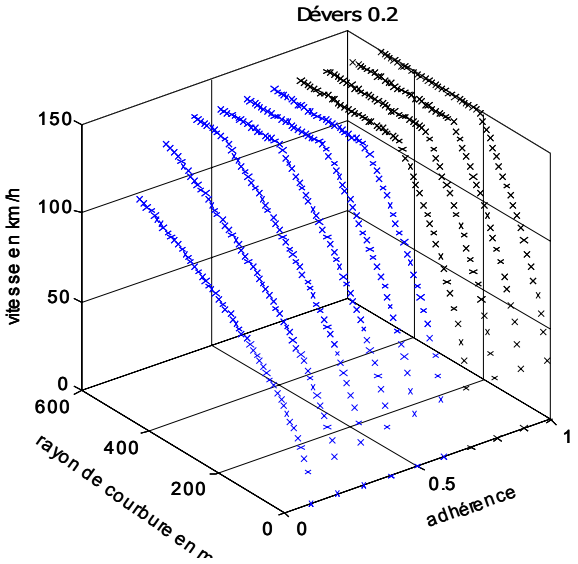


Figure 5 – V_{max} pour un dévers de 2%

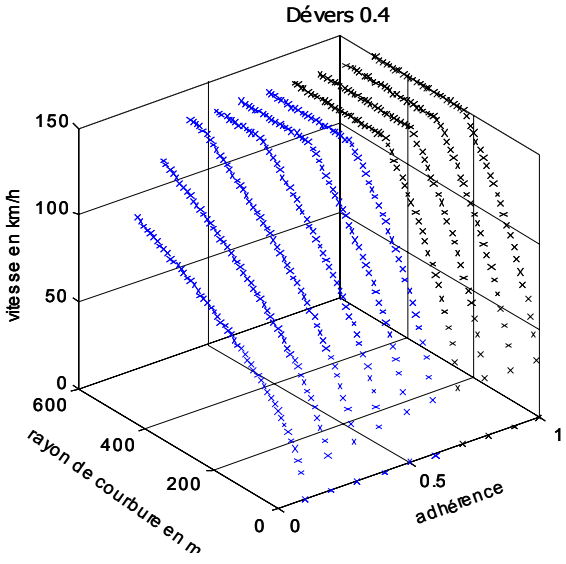


Figure 6 – V_{max} pour un dévers de 4%

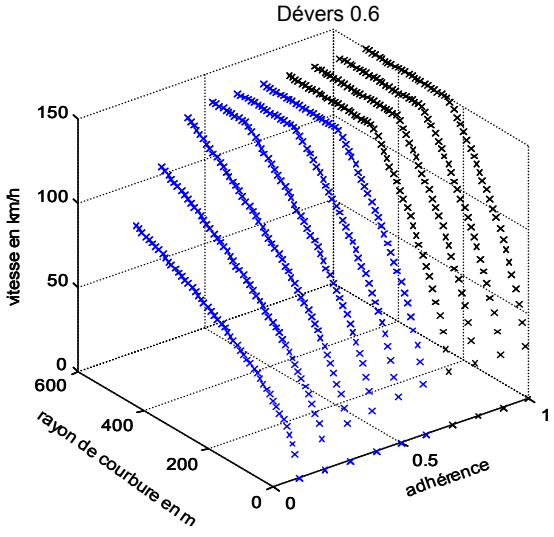


Figure 7 – V_{max} pour un dévers de 6%

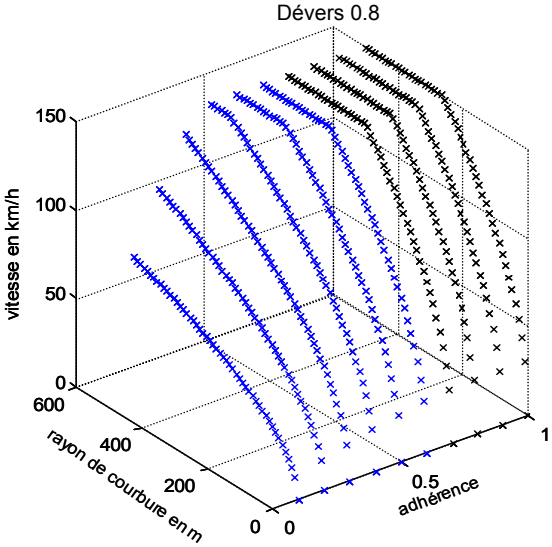


Figure 8 – V_{max} pour un dévers de 8%

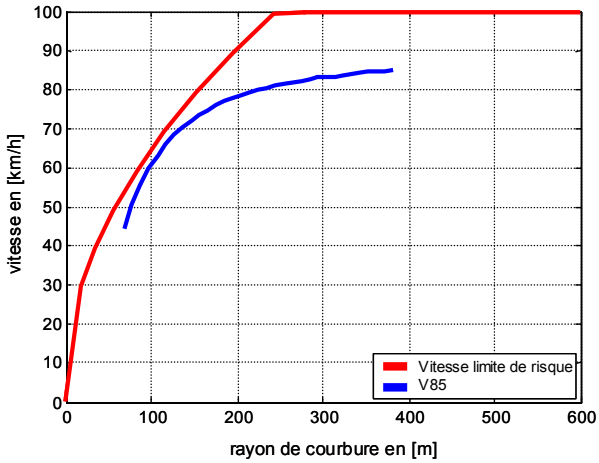


Figure 9 – Comparaison entre vitesse limite et V_{85}

L'analyse des résultats permet de distinguer deux zones de risque. Il s'agit d'une zone de risque de glissement, coïncidant avec la plage de faible adhérence et d'une zone de risque de renversement qui coïncide avec la plage de haute adhérence. Cette adhérence correspond à l'adhérence mobilisée pour diriger latéralement le véhicule lourd.

Enfin, la figure 9 compare la vitesse limite et la V_{85} (vitesse en dessous de laquelle se situent 85% des véhicules, théoriquement déterminée par $V_{85} = \frac{92}{1 + 346 / R^{1.5}}$, où R est le rayon de courbure en m). pour des valeurs d'adhérence de 0,55 et de dévers de 5%. La relation entre la V_{85} et le rayon de courbure a été réactualisée par le CETE Normandie Centre en 2008 pour différentes catégories de véhicules. La relation prise en compte dans cette étude est celle concernant uniquement les véhicules de catégorie 10, à savoir les tracteurs semi-remorques. Dans le cas de virages de rayon de courbure compris entre 90 et 150 m, le poids lourd a une vitesse proche de la vitesse maximale. On peut ainsi évaluer un risque pour l'usager et proposer un système d'alerte en fonction de l'écart entre la vitesse réelle pratiquée (V_{85}) et la vitesse limite. Cette approche est utilisée particulier dans le cadre du développement du logiciel de détection des situations à risque AlertinfraPL à destination des gestionnaires.

5. Conclusion

Cet article présente une méthode de détermination des vitesses limites en virage pour des véhicules lourds de types articulés. Cette méthode est basée sur une approche cinématique qui prend en compte le comportement dynamique du véhicule en interaction avec l'infrastructure. Le comportement dynamique du véhicule articulé est représenté par un modèle « bicyclette étendu ». Il permet à la fois de présenter la dynamique en virage du véhicule (dynamique latérale) ainsi que les forces de contact pneu/chaussée. De plus, l'infrastructure est prise en compte au travers de ses caractéristiques géométriques (rayon, dévers) et de surface (adhérence disponible). En revanche, le conducteur est caractérisé par ses actions (commandes) d'une façon indirecte dans le modèle.

La comparaison de la V_{max} et de la V_{85} a permis de mettre en évidence le risque sur certaines configurations de l'infrastructure, comme des courbes de faible adhérence et faible rayon (CFT < 0, 55 et R < 140m). Ces résultats sont utilisés dans le cadre du développement du logiciel AlertinfraPL.

Ces travaux vont se poursuivre par l'amélioration du calcul de la vitesse limite en prenant en compte de nouveaux paramètres comme la pente, et la dynamique longitudinale de l'ensemble tracteur semi-remorque. Une analyse de sensibilité et d'influence des différents paramètres sur le calcul des vitesses limite en virage en fonction de la précision des données d'entrées notamment celles relatives à l'infrastructure est envisagée.

Références

- Bouteldja, M. (2005), « Modélisation des interactions dynamiques poids lourd/infrastructures pour la sécurité et les alertes », Thèse de doctorat, Univ de Versailles St Quentin-en-Yvelines.
- Bouteldja, M. et Cerezo, V. (2009), « Méthodologie de détermination des vitesses limites de perte de stabilité des poids lourds en virage », Rapport interne de l'opération de recherche PLINFRA.
- Dupré, G., Floris, O., Patte, L. (2002), « Amélioration de la sécurité des virages, des routes principales et en rase compagne », CETE-Normandie-Centre et SETRA, Ref E0214, pp. 36.
- Glaser, S. (2004), « Modélisation et contrôle d'un véhicule en trajectoire limite : application au développement d'un système d'aide à la conduite », Thèse de l'université Evry-Val-D'Esonne.

- Glaser, S., Mammar, S., Daklallah, J. (2008), « Méthode de calcul de la vitesse de référence », Livrable 2.D2, Projet DIVAS.
- ONISR, (2003-2005), « Impact du contrôle sanction automatisé sur la sécurité routière », rapport de l'ONISR avec les contributions du Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA), du réseau technique (DREIF et CETE NC), et de l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (INRETS).
- Varhelyi, A., Hjalmdahl, M., Hyden, C., Almqvist, S., (2000), "Preliminary Results from A Large Scale Trial with Intelligent Speed Adaptation in Lund, Sweden", Proceedings of 7th ITS World Congress.
- Baker, D., Bushman, R., Berthelot, C., (2007), "Effectiveness of Truck Rollover Warning Systems", Journal of the Transportation Research Board, Vol 1779 / 2001, pp 134-140.
- SETRA, Facteurs d'accidents liés à l'infrastructure, disponible sur le site : http://www.setra.equipement.gouv.fr/Fiches-Savoirs-de-Base-en-Securite.html

NOUVELLE APPROCHE POUR L'ESTIMATION DES FORCES D'IMPACT D'UN POIDS LOURD

Omar KHEMOUDJ **Hocine IMINE**
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
Paris, France

Mohamed DJEMAÏ
LAMIH, CNRS FRE 3304
Université de Valenciennes
Valenciennes, France

Résumé
Les poids lourds de par leurs caractéristiques géométriques et physiques sont une source importante d'insécurité routière pour l'ensemble des utilisateurs du réseau routier. Une connaissance des transferts de charges dynamiques dans le véhicule constitue une information utile permettant de limiter les risques d'accident à l'aide de systèmes d'alerte et de contrôle actif embarqués. Dans cet article, une méthode d'estimation robuste des forces d'impact de véhicules poids lourd est présentée. Un modèle couplé est utilisé : un modèle de dynamique du châssis dans le plan de lacet et un modèle de dynamique de l'essieu dans le plan de roulis. Dans la méthode proposée, les capteurs issus du bus CAN du véhicule sont exploités auxquels seront ajoutés des capteurs à faible coût. En vue d'optimiser la configuration de capteurs, on introduit un différentiateur exact afin d'estimer les accélérations à partir des vitesses mesurées. Le modèle est ensuite inversé afin de reconstituer les forces inconnues. L'approche est validée à l'aide du simulateur de dynamique véhicule PROSPER.

Mots-clés: Poids lourds, Forces d'impact, Renversement, Estimations.

Abstract
Heavy duty vehicles are particularly dangerous and usually involved in accidents and road insecurity. A clear knowledge of the load transfers in the vehicles is a very useful information that could be used to prevent accidents by alerting the driver at right time and to use on-board active systems. In this paper, an estimation method for impact forces is proposed. It is a model based method making use of a yaw plane dynamics model for chassis and roll plane dynamics model for axles. The main sensors of the vehicle CAN bus with some additional low cost sensors are used. In order to optimize sensor configuration, a robust differentiator is used to derive acceleration from measured velocities. The global model is then inverted and the unknown forces are reconstructed. The approach is validated using the software simulator PROSPER.

Keywords: Heavy duty vehicles, Impact forces, Rollover, Estimation.

1. Introduction

L'estimation des forces d'impact est primordiale pour l'implémentation de systèmes d'alerte et de contrôle actif sur les poids lourds en vue d'améliorer leur sécurité routière (renversement) et diminuer leur agressivité sur la chaussée. La prédiction du renversement est basée sur le coefficient de transfert de charge qui dépend des forces d'impact dynamiques.

L'estimation des forces de contact est traitée dans (Ray, 1995) par un filtre de Kalman étendu utilisé pour estimer les forces longitudinales et latérales d'un modèle de véhicule bicyclette. Les forces sont considérées comme des états supplémentaires. Siegrist (2003) a appliqué un algorithme d'estimation similaire sur des poids lourds. L'inconvénient principal de cette approche est la sensibilité des forces estimées vis-à-vis des paramètres du filtre.

Bouteldja (2005) et Imine (2008) ont utilisé des observateurs à modes glissants pour estimer les forces de contact des poids lourds, fonction du profil de la chaussée mesuré par exemple avec un APL, et du déplacement vertical de la roue estimé. La force verticale est obtenue en multipliant la déformation du pneumatique par sa constante de raideur. Les forces longitudinales et latérales sont obtenues par un modèle de pneumatique de Pacejka. Cette méthode nécessite la connaissance exacte des paramètres du véhicule et du pneumatique.

Les forces d'impact peuvent aussi être déterminées par des jauges de déformation collées sur le moyeu de la roue. Cette solution de mesure précise reste coûteuse. La barre d'essieu peut également être instrumentée par des jauges mesurant les déformations en cisaillement. Cette méthode est néanmoins limitée à une conduite en ligne droite et ne convient pas pour des manœuvres en virage avec de larges forces latérales (Davis, 2008). De plus, l'utilisation des jauges dans le véhicule présente une complexité d'installation et d'étalonnage nécessitant un banc d'essai.

La méthode proposée consiste à utiliser un observateur à mode glissant (Khemoudj, 2009 et 2010) pour évaluer les forces considérées comme des entrées inconnues du modèle de véhicule. L'avantage de cette approche est d'éviter l'utilisation de tous les paramètres dynamiques du véhicule tels que la raideur, coefficient d'amortissement, rayon de la roue, etc. en simplifiant le modèle du véhicule et en ne s'intéressant qu'aux parties les plus pertinentes pour l'étude. Cette méthode permet aussi d'optimiser le nombre de capteurs, en utilisant les capteurs logiciels (observateur d'états).

2. Modélisation de la dynamique du poids lourd

Les observateurs et la validation de l'approche utilisent un modèle de lacet du véhicule tracteur et semi-remorque (Figure 1), avec deux essieux pour le tracteur et un essieu équivalent pour la semi-remorque.. Le comportement du véhicule est lié aux forces de contact chaussée-pneumatiques. On note F_{fx}, F_{rx} et F_{tx} les forces longitudinales à l'avant et à l'arrière du tracteur et sur l'essieu de la semi-remorque, F_{fy}, F_{ry} et F_{ty} les forces à l'avant et à l'arrière du tracteur et sur l'essieu de la semi-remorque. δ est l'angle de braquage des roues avant du tracteur et θ est l'angle de lacet relatif entre le tracteur et la remorque.

Une description détaillée des équations du modèle mécanique est donnée dans (Khemoudj et al., 2010). L'équation (1) donne le modèle dynamique du véhicule sous forme d'état.

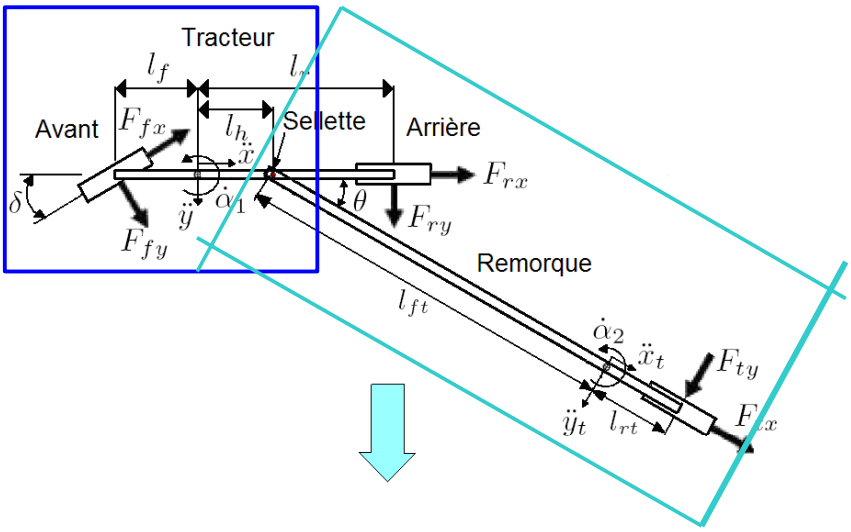


Figure 1 –Modèle étendu à un véhicule tracteur-semi remorque

$$\begin{cases} \dot{X}_v = Bu + W_1(u)u_F \\ Y = \begin{bmatrix} X_v \\ W_2(u)u_F \end{bmatrix} \end{cases} \quad (1)$$

où X_v est le vecteur d'état composé des vitesses de lacet du tracteur et de la remorque, et des vitesses de rotation des roues, mesurées. Le vecteur Y est le vecteur de sortie du modèle, composé des accélérations longitudinales et latérales du tracteur et de la remorque et des mesures du vecteur d'état.

Le vecteur d'entrée u, connu, est composé des couples aux roues, de l'angle de braquage à la roue δ et l'angle de lacet relatif θ qui peut être obtenu à partir des mesures de vitesse de lacet du tracteur et de la remorque. Les matrices $B \in R^{5\times5}$, $W_1(u) \in R^{5\times8}$ et $W_2(u) \in R^{4\times8}$ sont des matrices du modèle d'état connues, composées de paramètres du véhicule ainsi que des entrées du modèle contenues dans le vecteur u. Le vecteur des forces inconnues u_F en entrée du modèle est composée des forces inconnues appliquées au véhicule dans le plan de lacet, à savoir les résultantes par essieu des forces longitudinales, latérales, ainsi que les composantes longitudinales et latérales de la force sur la sellette.

Pour évaluer les forces verticales, nous avons introduit un modèle de roulis de l'essieu (Figure 2) dont les équations de mouvement dans le plan vertical sont (pompage) :

$$F_{z,l} + F_{z,r} = F_{s,l} + F_{s,r} + M_{ax}g + M_{ax}a_{ax} \quad (2)$$

et pour les moments de roulis :

$$(F_{z,l} - F_{z,r})\ell = (F_{s,l} - F_{s,r})\ell_s + F_y r_w + I_{ax}a_\Phi \quad (3)$$

où $g = 9.81 m/s^2$, $F_{z,l}$ et $F_{z,r}$ = forces verticales à gauche et à droite de l'essieu, $F_{s,l}$ et $F_{s,r}$ = forces de suspension à droite et à gauche de l'essieu, F_y = force latérale totale appliquée à l'essieu, somme des forces latérales gauche $F_{y,l}$ et droite $F_{y,r}$, M_{ax} = masse de l'essieu, I_{ax} = moment d'inertie de l'essieu autour de l'axe de roulis, a_{ax} = accélération de pompage, a_Φ = accélération de roulis, ℓ = distance entre le point d'application de la force de suspension et le centre de gravité de l'essieu, ℓ_s = distance entre le point d'application de la force verticale et le centre de l'essieu, et enfin r = distance du sol au centre de gravité de l'essieu. En vue de simplifier le problème, nous avons fait trois hypothèses.

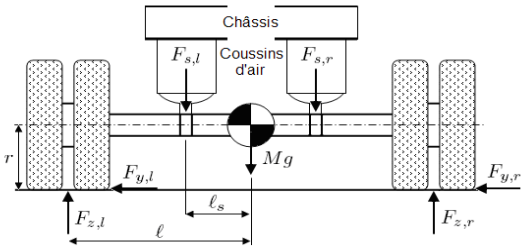


Figure 2 – Modèle de roulis d'un essieu de poids lourd

Hypothèse 1. le centre de roulis et le centre de gravité de l'essieu sont confondus. Ce qui permet de considérer le roulis autour de l'axe longitudinal passant par le centre de gravité de l'essieu.
Hypothèse 2. l'essieu est rigide et parfaitement symétrique, et donc le centre de symétrie est au milieu.
Hypothèse 3. le rayon de roue reste constant ce qui permet d'écrire le moment des forces latérales sur l'essieu en fonction du rayon de la roue.
Remarque. Les forces agissant entre le châssis et l'essieu peuvent être mesurées à l'aide de capteurs de pression au niveau des coussins d'air des suspensions pneumatique du poids lourd étant donné que la force est quasi proportionnelle à la pression dans le coussin.

3. Validation du modèle

Dans cette partie, les résultats de validation du modèle sont présentés (Figures 3, 4 et 5). La validation du modèle de lacet et du modèle vertical d'essieu est établie à l'aide du simulateur PROSPER développé par SERA-CD (Delanne, 2003). Il s'agit d'un outil validation mettant

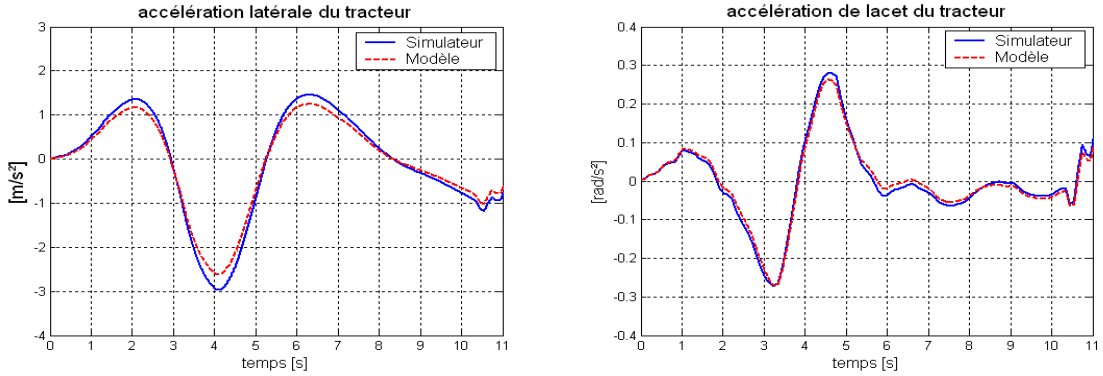


Figure 3 – Validation du modèle de lacet du tracteur

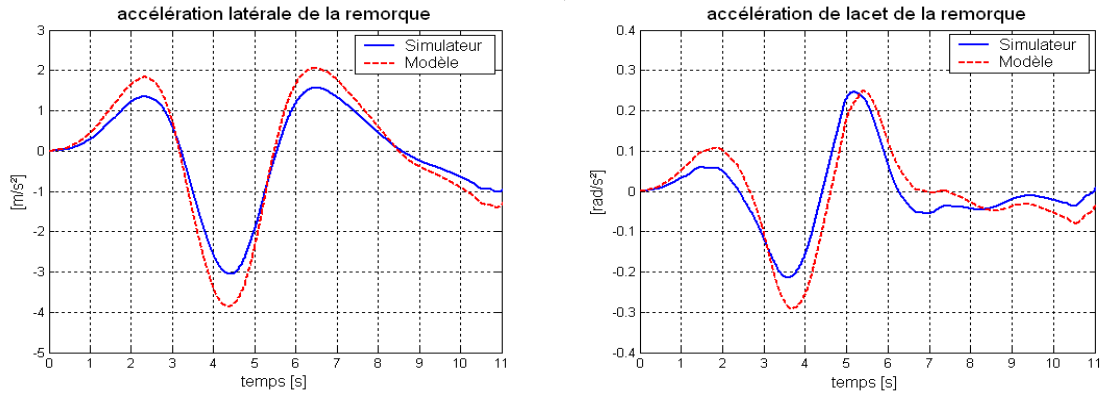


Figure 4 – Validation du modèle de lacet de la remorque véhicule

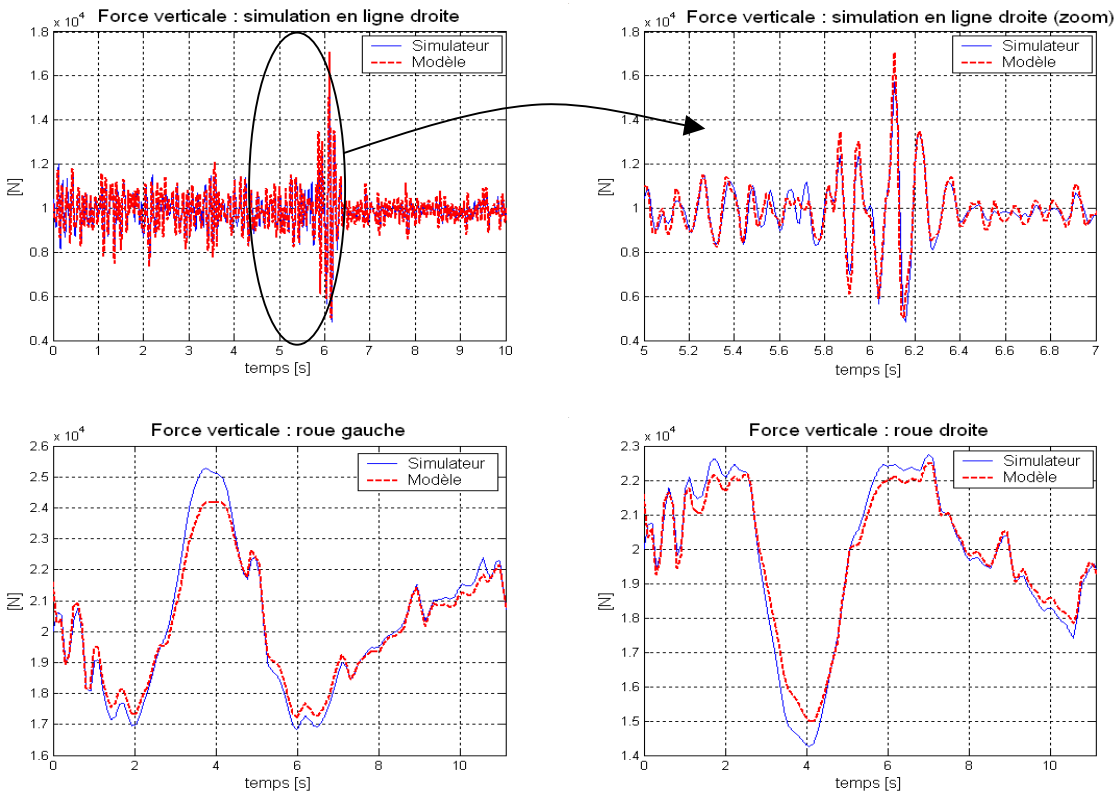


Figure 5 – Validation du modèle d'essieu en chicane

à disposition un modèle complet et très proche de la réalité. Nous avons simulé un scénario en ligne droite et en chicane afin de provoquer des transferts de charge dans le véhicule. Nous avons également introduit un profil de chaussée réel (acquisition sur une portion de route de la RN4) lors de la simulation. Nous présentons les résultats de validation dans le plan de lacet du véhicule aux figures 3 et 4 et les résultats de validation dans le plan de roulis à la figure 5.

Ces figures indiquent que la réponse du modèle est très proche de celle donnée par le simulateur. Par ailleurs, le modèle convient à une implémentation en temps réel car constitué de paramètres limités et généralement connus. Dans la prochaine section, nous présentons une méthode d'estimation permettant de reconstituer les forces d'impact dans le véhicule.

4. Estimation des accélérations et des forces d'impact

La méthode utilisée pour estimer les forces d'impact du poids lourd comporte deux étapes principales : (i) estimation des forces latérales appliquées sur les essieux, (ii) détermination des forces verticales. L'approche est basée sur l'utilisation d'un différentiateur exact fréquemment utilisé en génie automatique. Il s'agit d'un algorithme d'estimation permettant d'obtenir en temps réel la dérivée d'un signal mesuré, après un temps de convergence limité (on parle de convergence en temps fini). Nous utilisons le différentiateur exact pour obtenir les accélérations de lacet à partir des vitesses de lacet mesurées.

Après estimation des accélérations par le différentiateur exact, nous inversons le modèle mécanique en vue d'obtenir les forces dans le plan de lacet, notamment latérales. Enfin, les forces latérales estimées permettent de reconstituer les forces verticales à partir du modèle de roulis (Figure 6).

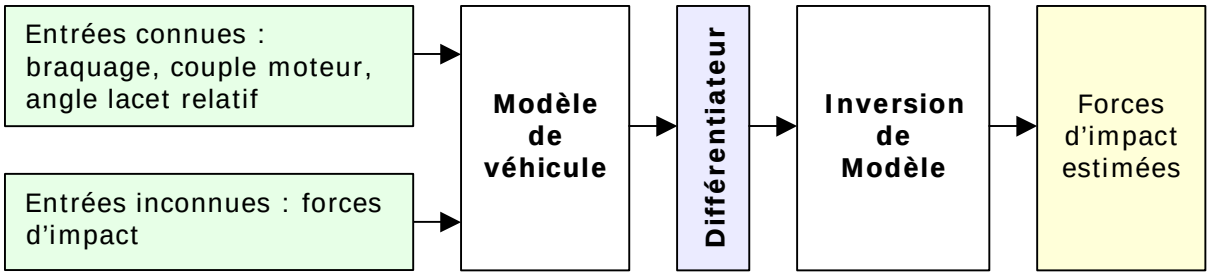


Figure 6 – Méthode d'estimation des forces d'impact sur poids lourd

Le différentiateur converge en temps fini. L'avantage du différentiateur exact par rapport aux autres (par ex. l'approximation d'Euler) est qu'il ne génère pas de déphasage. Les figures 7 à 12 montrent les résultats de l'estimation des accélérations et des forces latérales et verticales, pour un scénario de conduite en chicane. Les forces estimées sont comparées à celles données par PROSPER. Le véhicule articulé simulé, représentatif du trafic, comporte un tracteur et une semi-remorque à essieu tridem. Les figures 7, 8 et 9 à 12 donnent l'estimation des accélérations de lacet pour le tracteur et la semi-remorque, l'estimation de la force latérale de la remorque (essieu équivalent), et les résultats d'estimation des forces verticales au niveau de la remorque pour différents charges et type d'uni.

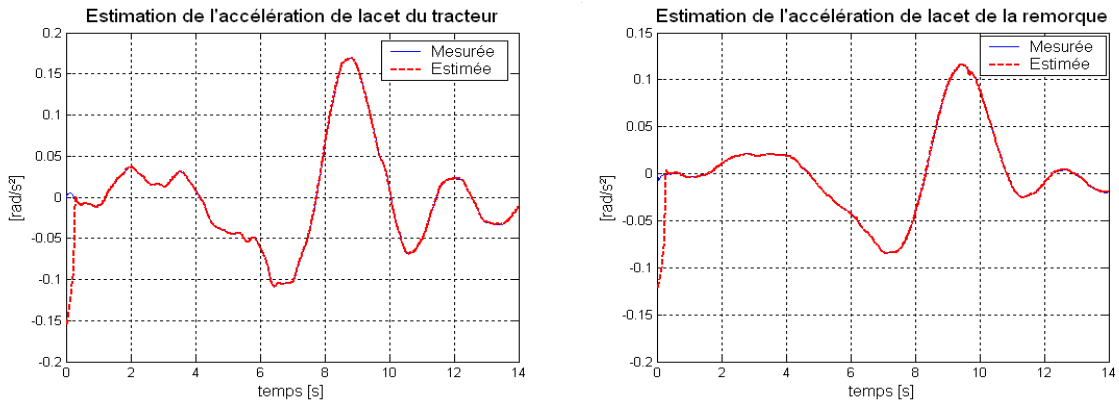


Figure 7 – Estimation des accélérations de lacet du tracteur et de la remorque par différentiateur exact

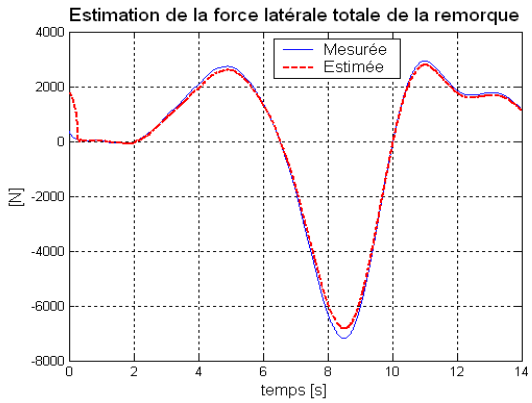


Figure 8 – Estimation de la force totale latérale de remorque

Les accélérations de lacet sont bien estimées à partir des vitesses de lacet mesurées par les gyromètres. La convergence est atteinte en temps fini, par ex. en 0.3 s à la figure 7, ce qui est très acceptable pour une implémentation en temps réel.

Le phénomène de broutement (oscillation à haute fréquence de l'estimée autour de la valeur réelle) dû au mode glissant a pu être réduit à l'aide d'un choix judicieux des gains du différentiateur. De plus, on note l'absence de déphasage entre les accélérations mesurées et estimées ce qui permet de conclure sur l'efficacité du différentiateur exact.

A partir des valeurs estimées des accélérations, on détermine la force latérale totale (figure 8) obtenue par une inversion du modèle. La force latérale est estimée après un court temps de convergence qui correspond au temps de convergence des estimations des accélérations. En vue de tester la robustesse de la méthode, nous avons introduit un profil de chaussée issu d'une acquisition sur la route nationale RN10 et sur une distance de 700 mètres. Le profil est représenté à la figure 10.

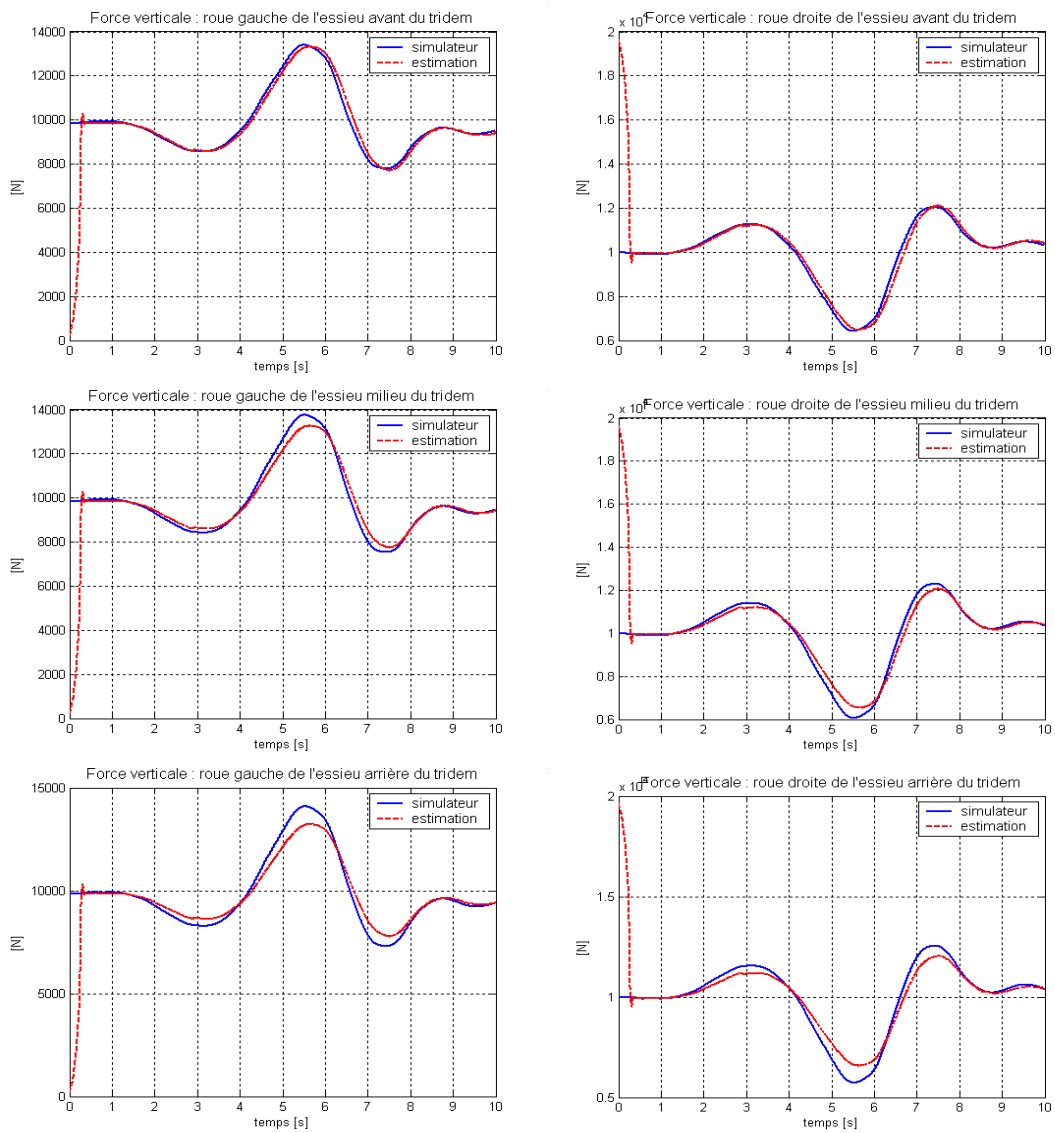


Figure 9 – Estimation des forces verticales de la remorque à vide et uni nul

Les forces verticales sont estimées au niveau de chaque essieu. Une première simulation (figure 9) est d'abord réalisée sur un uni parfait (profil de chaussée plat) avec véhicule à vide. Ensuite, l'uni de la RN 10 est introduit dans le simulateur. Trois configurations ont été testées : véhicule à vide, à mi-charge et à pleine charge. Les résultats montrent qu'il existe une sensibilité de

l'estimation par rapport à la charge, due aux erreurs de modélisation et à l'hypothèse que la force latérale estimée est uniformément répartie sur les essieux du tridem (essieu équivalent). L'erreur d'estimation est néanmoins inférieure à 5% pour un véhicule à vide ou à mi-charge et aux alentours de 10% pour un véhicule pleine charge.

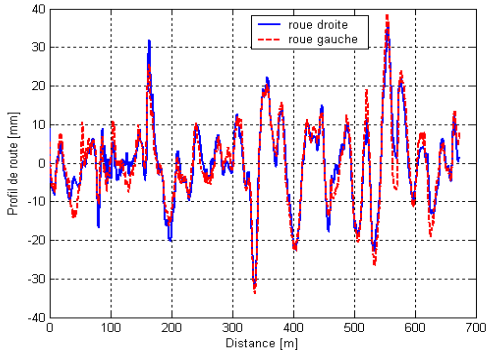


Figure 10 – Segment du profil de chaussée de la RN10

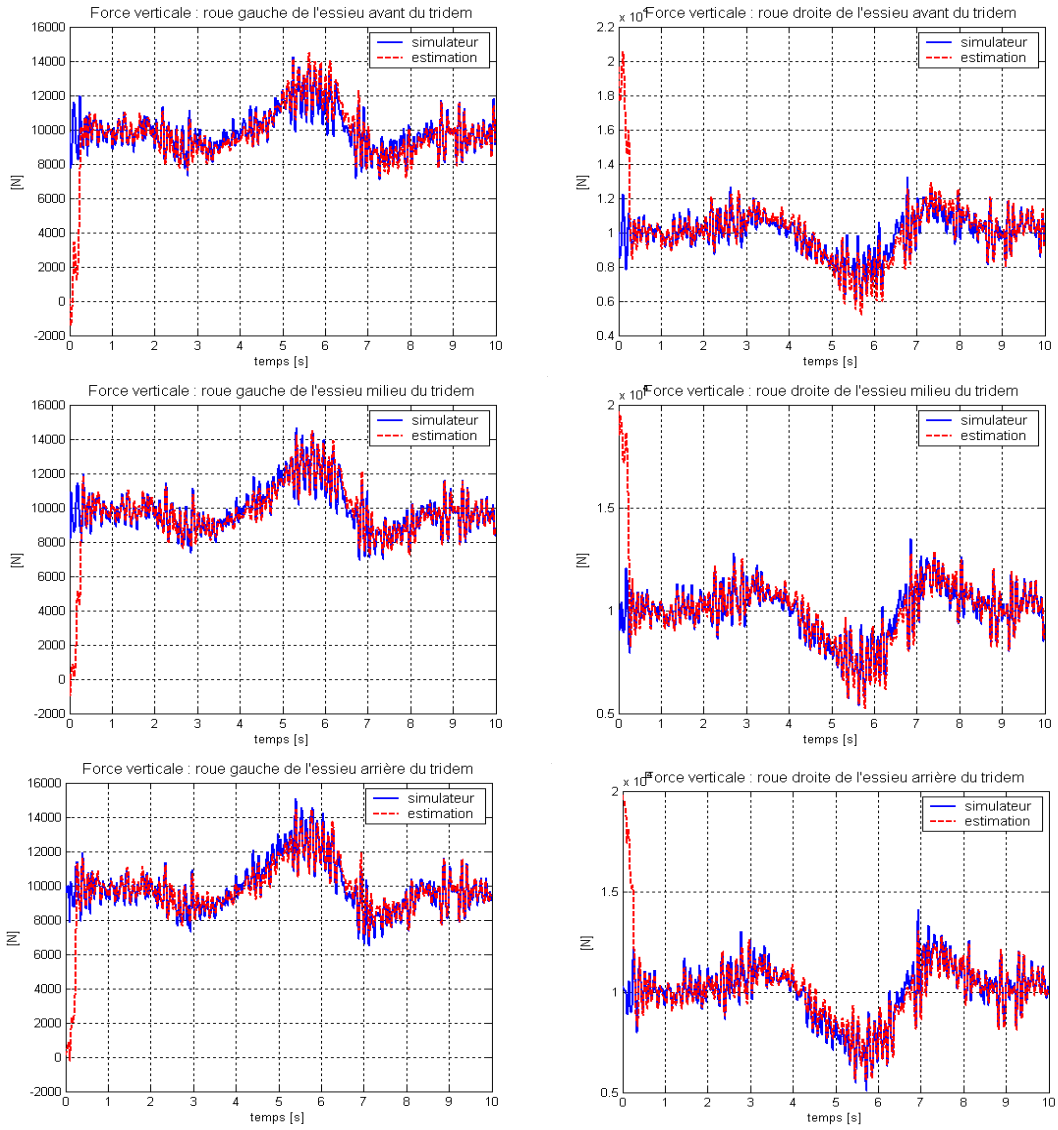


Figure 11 – Estimation des forces verticales de remorque à mi-charge (30T)

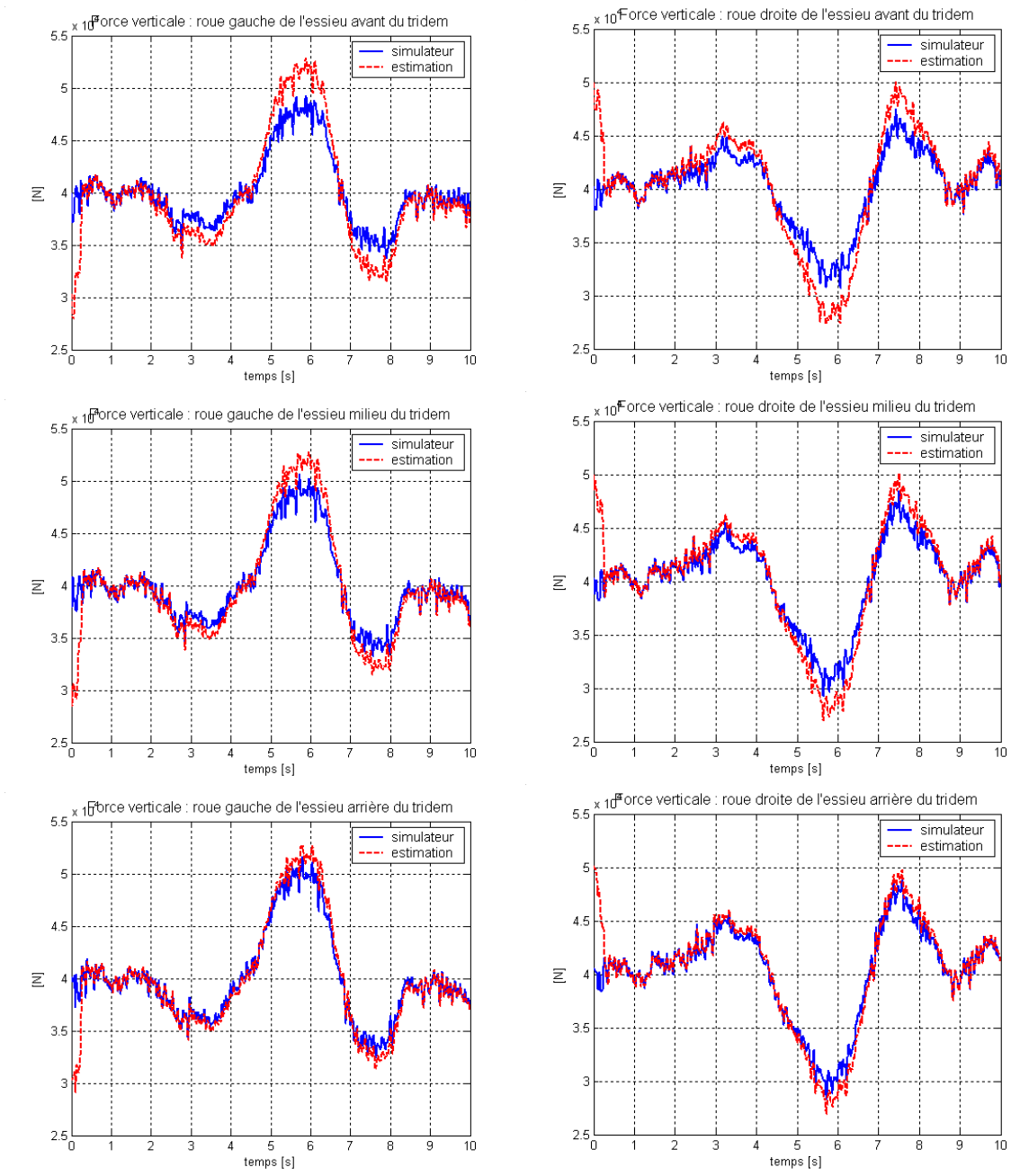


Figure 12 – Estimation des forces verticales de remorque à pleine charge (40T)

5. Cas d'application : prédiction du renversement

Une applications de l'estimation des forces d'impact est la prédiction du renversement et le contrôle actif permettant de l'éviter. En effet, la connaissance en temps réel et en embarqué des forces d'impact verticales et leur répartition sur les différentes roues permet d'obtenir une indication sur le degré de stabilité du véhicule et sa tendance au renversement. Un dispositif de contrôle permettra aussi de stabiliser les charges et donc réduire leur effet sur la chaussée.

L'approche est basée sur le coefficient de transfert de charge (LTR ou *load transfer ratio*) calculé à partir des forces d'impact verticales estimées des roues gauches et droites de la remorque. Il est donné par la formule :

$$LTR = \frac{F_{z,g} - F_{z,d}}{F_{z,g} + F_{z,d}} \qquad (21)$$

où $F_{z,g}$ et $F_{z,d}$ sont les sommes des forces verticales des roues gauche et droite de la remorque. La figure 13 illustre l'estimation du LTR sur un exemple de conduite en chicane.

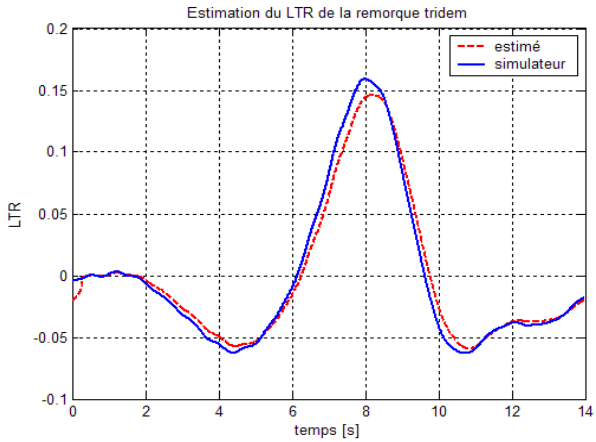


Figure 13 – Estimation du LTR de la remorque

Le LTR estimé peut être utilisé comme indicateur de risque de renversement du véhicule sachant qu'un $LTR = \pm 1$ correspond à un décollement des roues et une amorce de renversement. On sélectionne donc un seuil <1 à partir duquel le conducteur est alerté de l'instabilité de la remorque. Des simulations permettent de spécifier une zone de tolérance du LTR.

Un tel système d'alerte peut être couplé à un système de commande active qui permettrait de stabiliser la remorque jusqu'à ce que le conducteur puisse réagir comme indiqué en figure 14.

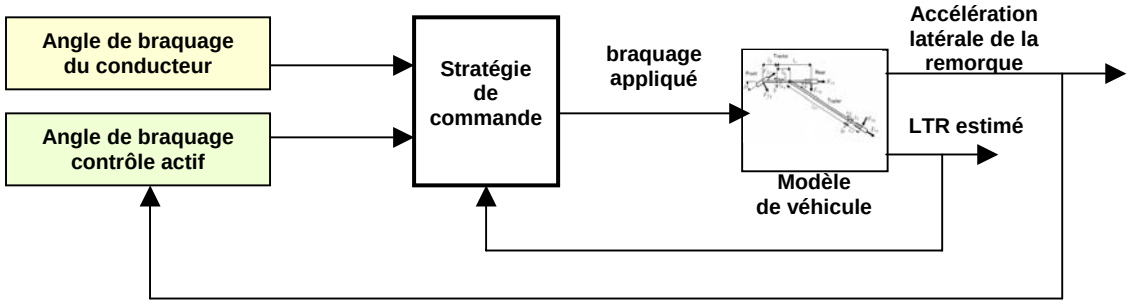


Figure 14 – Boucle de commande

Dès que le LTR dépasse un seuil de sécurité, le système de contrôle actif est déclenché et agit sur l'angle de braquage du véhicule. La régulation se fait en minimisant l'accélération latérale de la remorque en agissant sur l'angle de braquage pendant un coup instant. Lorsque le LTR n'est plus dans la zone critique, le conducteur peut reprendre la main sur le véhicule, le renversement étant évité.

6. Conclusion

La méthode présentée estime les forces verticales appliquées au niveau des essieux d'un tracteur avec semi-remorque. Elle fournit une solution pratique pour évaluer les charges verticales dynamiques des poids lourds, utilisées pour alerter le conducteur d'une instabilité de la remorque. Un schéma de contrôle actif permettant d'agir sur le véhicule pour éviter le renversement est

également proposé. La boucle de commande sera testée sur simulateur en utilisant différents scénarii de conduite et différentes techniques de commande. La méthode d'estimation des forces d'impact peut également être couplée à un système de contrôle actif (suspension active par exemple) en vue de minimiser les variations des charges dynamiques et de les stabiliser autour des valeurs statiques, pour réduire l'agressivité des poids lourds sur les chaussées et protéger l'infrastructure.

Références

- Ray, L.R. (1995), "Non linear state and tire force estimation for advanced vehicle control", in Proc. IEEE Transaction on control systems technology, 3(1), 117-124.
- Siegrist, P.M. (2003), "A methodology for monitoring tyre-forces on off-highway mining trucks", PhD Thesis, Queensland University of Technology, Australia.
- Bouteldja, M. (2005), « Modélisation des interactions dynamiques poids lourd/ infrastructures pour la sécurité et les alertes », thèse de doctorat de l'université de Versailles Saint-Quentin.
- Imine, H. & Dolcemascolo, V. (2008), "Sliding mode observers to heavy vehicle vertical forces estimation", Journal of Heavy Vehicle Systems, 15(1) , 53–64.
- Davis, L. and Bunker, J. (2008), "Suspension testing of 3 heavy vehicles-methodology and preliminary frequency analysis", Technical report, Queensland University of Technology and Queensland Department of Main Roads.
- Khemoudj, O., Imine, H. and Djemaï, M. (2009), "Unknown input observation via sliding modes: application to vehicle contact forces", in Proc. IEEE Multi-conference on Systems and Control 2009, 1720-1725
- Khemoudj, O., Imine, H. and Djemaï, M. (2010), "Robust observation of tractor-trailer vertical forces using inverse model and exact differentiator", SAE World Congress, Detroit, April.
- Delanne, Y., Schmitt, V. and Dolcemascolo, V. (2003), "Heavy truck rollover simulation", in Proc. 18th International Conference on the Enhanced Safety of Vehicles.
- Saadaoui, H., Manamanni, N., Djemaï, M., Barbot, J.P. and Floquet, T. (2006), "Exact differentiation and sliding mode observers for switched Lagrangian systems", Nonlinear Analysis, ed. Elsevier, 65(3), 1050-1069.

DIAGNOSTIC DE RUPTURE D'UN ITINÉRAIRE : DÉVELOPPEMENT ET PERSPECTIVES D'UTILISATION

Daniel LECHNER **Claire NAUDE**
INRETS, Département Mécanismes d'Accidents
Salon de Provence, France

Lghani MENHOUR
INRETS, Département
Mécanismes d'Accidents
Salon de Provence, France
HEUDIASYC
Compiègne, France

Résumé
L'application "Diagnostic de rupture d'un itinéraire" consiste à identifier la vitesse limite de franchissement d'une infrastructure routière, en réalisant par simulation temps réel embarquée une extrapolation des comportements observés dans une situation de conduite maîtrisée vers une perte de contrôle. Ces travaux de recherche menés par l'INRETS MA sur son véhicule laboratoire Peugeot 307 ont été initiés dans le cadre du projet RADARR du programme SARI, et sont illustrés par l'évaluation de la vitesse limite de franchissement sur un site expérimental situé dans les Côtes d'Armor. Les influences de variantes de paramétrage, concernant la pression de gonflage de pneumatiques, les performances du conducteur et l'adhérence du revêtement, sont également illustrées. On évoque enfin les perspectives de déploiement de cette application.

Mots-clés: Dynamique des véhicules, perte de contrôle, automate de conduite, vitesse limite, diagnostic, infrastructure routière, temps réel.

Abstract
The application "Rupture Diagnosis on an Itinerary" is aimed at identifying the maximal achievable speed on a road, through an extrapolation of vehicle behaviour, performed by real time embedded simulations. This research work, carried out on INRETS-MA Laboratory Vehicle Peugeot 307, was initiated in the RADARR project, part of the SARI program. The potential of this concept is illustrated through the search of the maximal achievable speed on one experimental site located in the Côtes d'Armor area. The potential influences of different model parameters, including tire inflation pressure, driver performances and road grip level are also illustrated. Finally the perspectives to deploy this application are evoked.

Keywords: Vehicle dynamics, loss of control, driving automat, maximal speed, diagnosis, road itinerary, real time.

1. Introduction

L'application "DIAgnostic de Rupture d'un Itinéraire", baptisée DIARI, consiste à identifier la vitesse limite de franchissement d'une infrastructure routière. Ces travaux de recherche menés par l'INRETS MA sur son véhicule laboratoire Peugeot 307 (Lechner, 2008) ont été initiés dans le cadre du projet RADARR du programme SARI (Action fédérative du PREDIT), dont l'objectif général était la mise en place sur des itinéraires routiers de systèmes d'informations alertant les conducteurs d'un risque de perte de contrôle de leur véhicule, lié à une rupture physique de l'itinéraire en rase campagne.

1.1 Etat de l'art

De nombreux travaux ont cherché à établir une vitesse de franchissement limite ou conseillée sur une infrastructure. Le modèle le plus simple, traditionnellement utilisé dans les systèmes d'alerte est une extrapolation de la formule de l'accélération transversale ; il ne prend en compte que la courbure de la trajectoire ρ et l'état de surface de la chaussée à travers le coefficient de frottement latéral maximal à l'interface pneumatique-chaussée μ_{lat}, associé à l'accélération de la pesanteur g (1). La NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration), dans son guide CAMP (2004) pour la conception et le développement des "Curve Warning Systems", complète cette formule en y intégrant l'effet du dévers de la chaussée ϕ (2). Le modèle développé par Glaser (2004), et utilisé par Sentouh et al. (2006), est plus complet (3) : il intègre également la pente θ, et tente de prendre en compte l'habileté du conducteur à travers le coefficient de frottement longitudinal (resp. latéral) utilisé par celui-ci $\lambda_{lat}\mu_{\max}$ (resp. $\lambda_{long}\mu_{\max}$), et quelques caractéristiques qui influencent fortement la stabilité du véhicule, comme la hauteur de son centre de gravité H, ou la distance entre le centre de gravité et l'axe de l'essieu avant (resp. arrière) L_{av} (resp. L_{ar}). Les 3 formules proposées sont les suivantes :

$$V_{\max} = \frac{\sqrt{g\mu_{lat}}}{\rho} \quad (1) \qquad V_{\max} = \sqrt{\frac{g}{\rho}\left(\frac{\phi + \mu_{lat}}{1 - \phi\mu_{lat}}\right)} \quad (2)$$

$$V_{\max}^2 = \frac{g}{\rho}\left(\left(1 - signe(\theta)\frac{H}{L_{av}}\theta\right)\sqrt{1 - \left(\frac{\theta}{\lambda_{long}\mu_{\max}}\right)^2}\,\lambda_{lat}\mu_{\max} - \phi\right) \quad (3)$$

S'appuyant également sur des formules de ce type, il convient de citer les travaux réalisés par Gothié (2008) dans le cadre de SARI/IRCAD, qui propose une approche détaillée pour déduire une adhérence mobilisable sur chaussée mouillée, à partir de relevés pluviométriques et d'une analyse des lignes d'écoulement de l'eau en fonction de l'orniérage des chaussées.

Concernant les études d'accidentologie de type clinique sur les pertes de contrôle des véhicules, on notera nos propres travaux à partir d'Etudes Détaillées d'Accidents, intégrant l'évaluation sécuritaire de l'ESP (Lechner, 2003), ainsi que des travaux sur les poids lourds menés dans le cadre du PREDIT2 sur le renversement des citernes (Schaefer et al. 2003), puis dans le cadre du programme K du LCPC, à travers les opérations TRUCKS (2003-2007) et PLINFRA (2008-2011). Des papiers traitant de ces aspects sont présentés par Bouteldja et Cerezo (2010) et Khemoudj et al. (2010).

1.2 Problématique de DIARI

Un diagnostic à grand rendement d'un risque de rupture le long d'un itinéraire ne peut s'envisager de manière opérationnelle qu'avec un véhicule circulant dans le trafic à vitesse et niveau de sollicitation raisonnables, sans faire courir de risques aux usagers. Partant de ce constat, le concept original de DIARI consiste à tirer parti du potentiel de la simulation dynamique embarquée, en extrapolant les comportements réels vers une perte de contrôle virtuelle.

2. Méthodologie de DIARI

La méthodologie développée pour cette application se compose de plusieurs étapes :

- Le système embarqué au sein du véhicule laboratoire de l'INRETS MA découvre l'itinéraire sur la base d'un passage en sollicitations modérées (accélération latérale entre 3 et 6 m/s²), et reconstitue en temps réel le profil de la route.
- Plusieurs instances d'un modèle dynamique, l'un alimenté directement par les commandes du conducteur et les autres fonctionnant avec un incrément de vitesse par rapport au véhicule réel, sont alors lancées.
- Ces modèles permettent d'extrapoler les comportements observés lors du passage réel : par exemple on pourra utiliser trois modèles avec des incréments de vitesses de 10, 20 et 30 km/h.
- Ils s'efforcent de respecter la consigne de trajectoire grâce à un automate de conduite qu'ils intègrent (module logiciel de génération des commandes à appliquer par le conducteur pour respecter cette consigne).
- Le dispositif élabore également tout un ensemble de points de fonctionnement du véhicule par rapport aux limites physiques : niveaux d'accélération, taux de sollicitations relatifs, points de fonctionnement des pneumatiques, violence des prises de roulis et des reports de charge… Les investigations faites concernent notamment l'évolution des points de fonctionnement en fonction de l'augmentation de la vitesse.
- L'objectif final visé est l'identification de la vitesse qui conduira à franchir un des seuils de criticité pré-établis, traduisant l'imminence d'une perte de contrôle virtuelle.

2.1 Reconstruction de la trajectoire de consigne

Parmi les différentes approches envisageables pour reconstituer le rayon de courbure de la trajectoire, nous avons opté pour l'intégration des signaux d'un capteur donnant les composantes longitudinales et transversales de la vitesse. En ce qui concerne la reconstitution des pentes et dévers, en attendant la finalisation d'un observateur embarqué dédié, en cours de développement, nous avons la possibilité de relire en temps réel des fichiers de données issus des relevés de type VANI, qui avaient été réalisés sur les sites expérimentaux de SARI.

2.2 Modèle dynamique

Architecture

Un modèle dynamique de véhicule non-linéaire est bien évidemment nécessaire lorsqu'on envisage d'évaluer les limites de franchissement d'un véhicule dans une courbe. L'architecture retenue est issue des enseignements de nos travaux antérieurs en matière de validation de modèles dynamiques (Lechner et al. 1997, Lechner 2002). Elle vise à obtenir le meilleur compromis possible entre représentativité des phénomènes physiques, validité et simplicité. Il s'agit donc d'un système mécanique à 4 roues, considéré dans un plan, avec trois degrés de liberté (mouvements longitudinal, latéral et de lacet), mais pour lequel on adopte une description tridimensionnelle des forces à l'interface pneumatique-chaussée, qui intègre les transferts de charge, l'influence de l'inclinaison de la route à travers les pentes et dévers, ainsi que les principaux effets de l'élastocinématique des liaisons au sol. Le véhicule laboratoire de l'INRETS MA a pour cela bénéficié d'une caractérisation spécifique sur un banc dédié, car si la précision des capteurs n'influence pas réellement la détermination de la trajectoire limite, la qualité du paramétrage du modèle de véhicule et des pneumatiques peuvent influencer fortement la valeur de la vitesse limite obtenue. En outre, la capacité à faire tourner en temps réel, en parallèle et de manière continue, plusieurs instances de ce modèle est d'une importance capitale dans la réussite de l'application DIARI.

Modélisation des pneumatiques
La modélisation détaillée des pneumatiques dans le modèle de véhicule de DIARI repose sur une formulation de Pacejka couplée, telle que proposée par Bayle et al. (1993). Elle fournit les efforts longitudinaux et transversaux en fonction de 4 paramètres : l'angle de dérive, le taux de glissement, la charge verticale et l'angle de carrossage. La caractérisation des pneumatiques utilisés a été fournie par Michelin au LCPC dans le cadre du programme IRCAD de SARI. La notion d'adhérence du revêtement est donc totalement intégrée dans les données du modèle de pneumatique. Sur la base des informations de la partie gauche de la figure 3, pour la pression de gonflage nominale de 2.4 bar, on peut dire que le niveau d'adhérence transversale maximal disponible est respectivement de 1.05 pour 100 DaN de charge verticale, 0.987 pour 300 DaN, de 0.92 pour 500 daN et qu'il chute à 0.85 pour 700 daN.

2.3 Automate de conduite

Le principe même de vouloir simuler le comportement du véhicule en survitesse par rapport à des passages réels impose de recourir à un automate de conduite, c'est-à-dire un module logiciel développé en faisant appel à des techniques de l'automatique, et permettant de générer les commandes que devrait appliquer un conducteur au modèle de véhicule, pour obtenir le respect de la trajectoire de consigne. En effet, si on se contente d'augmenter la vitesse dans le modèle, tout en conservant les commandes réelles du conducteur mesurées avec une vitesse inférieure, la trajectoire obtenue sera simplement plus ouverte, en raison du gradient de sousvirage naturel de la plupart des véhicules à architecture classique (traction avant), qui fait que le braquage doit augmenter avec la vitesse pour respecter une trajectoire identique. Cependant les sollicitations dynamiques associées, notamment les accélérations transversales et angles de dérive, n'auront qu'un lointain rapport avec celles d'un véhicule franchissant réellement ce virage avec une vitesse correspondant à l'extrapolation envisagée. Les spécifications de cet automate sont d'être suffisamment performant pour assurer un suivi rigoureux de la trajectoire du véhicule, sans générer d'instabilité, et même de présenter des écarts par rapport à la trajectoire de référence, qui seraient uniquement liés à la dynamique intrinsèque du véhicule simulé (amorce de sur- ou sous-virage). Ces travaux font l'objet d'une thèse menée en collaboration avec le Laboratoire HEUDIASYC. Plusieurs approches ont été menées en parallèle pour concevoir cet automate. La version utilisée dans le cadre des travaux présentés dans cet article utilise deux jeux de multi-contrôleurs PID, assurant d'une part le respect de la consigne de lacet, et d'autre part le respect de l'écart latéral. Ces contrôleurs ont été synthétisés à partir de la méthode de Ziegler-Nichols (Menhour et al., 2009, 2010).

3. Résultats

3.1 Validation des différents composants

Les différents composants de l'application DIARI ont été validés d'abord individuellement puis ensemble en tirant parti des trois campagnes d'essais réalisées entre 2006 et 2008 sur les différents sites retenus pour le projet SARI dans le Département des Côtes d'Armor. Le modèle dynamique a déjà été validé en boucle ouverte (avec des entrées volant prédéterminées), puis en boucle fermée avec l'automate de conduite, sans puis avec une vitesse incrémentée. Cette dernière partie fait l'objet d'une approche originale : un essai réel, réalisé sur l'un des sites SARI est utilisé avec un incrément de vitesse et les résultats de simulation sont comparés avec ceux d'un autre essai réalisé sur le site et dont la vitesse réelle est cette fois égale, avec moins d'un km/h d'écart dans le virage proprement dit, à la vitesse du premier essai incrémentée. Cette approche nous a conduit à réaliser des passages à vitesses très stables lors de nos campagnes sur les sites, pour nous fournir le matériel nécessaire à cette partie spécifique de la validation. La figure 1 présente cette comparaison avec un incrément de 30 km/h. Les résultats obtenus sont satisfaisants et

l'association de l'automate, même avec un modèle de véhicule non linéaire, peut être considérée comme validée.

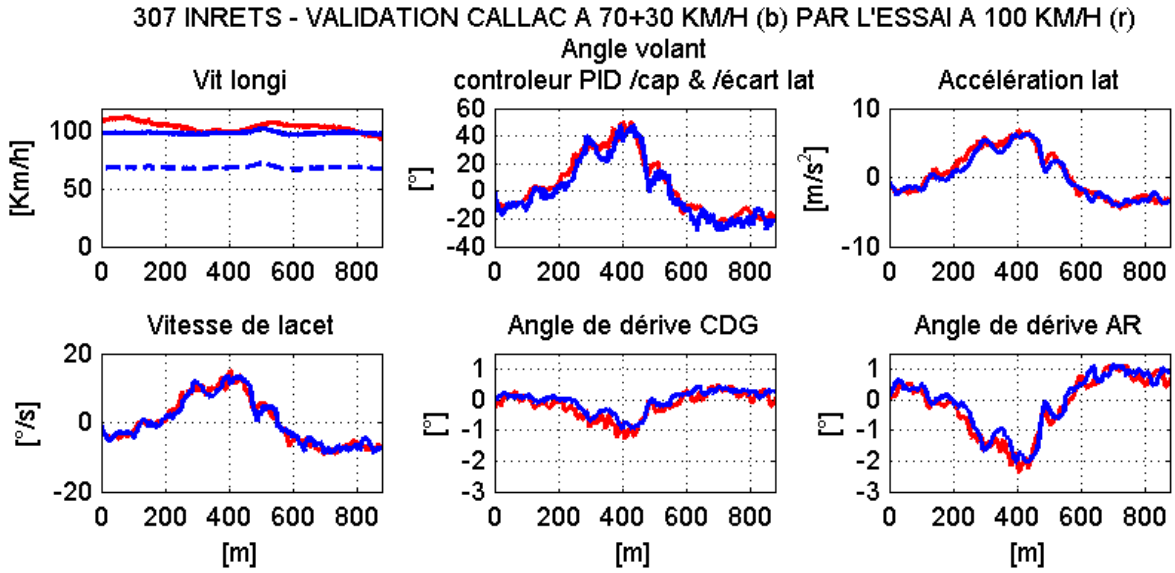


Figure 1 - Validation de l'ensemble Modèle de véhicule-Automate de conduite : un essai à 70 km/h est lancé avec un incrément de vitesse de 30 km/h et comparé avec un essai à 100 km/h

3.2 Recherche de la vitesse limite de franchissement sur les sites expérimentaux de SARI

La valorisation finale du concept de DIARI dans le cadre de RADARR s'est traduite par l'identification de la vitesse de franchissement limite sur les 3 sites expérimentaux de SARI, retenus pour RADARR, identifiés comme particulièrement accidentogènes.

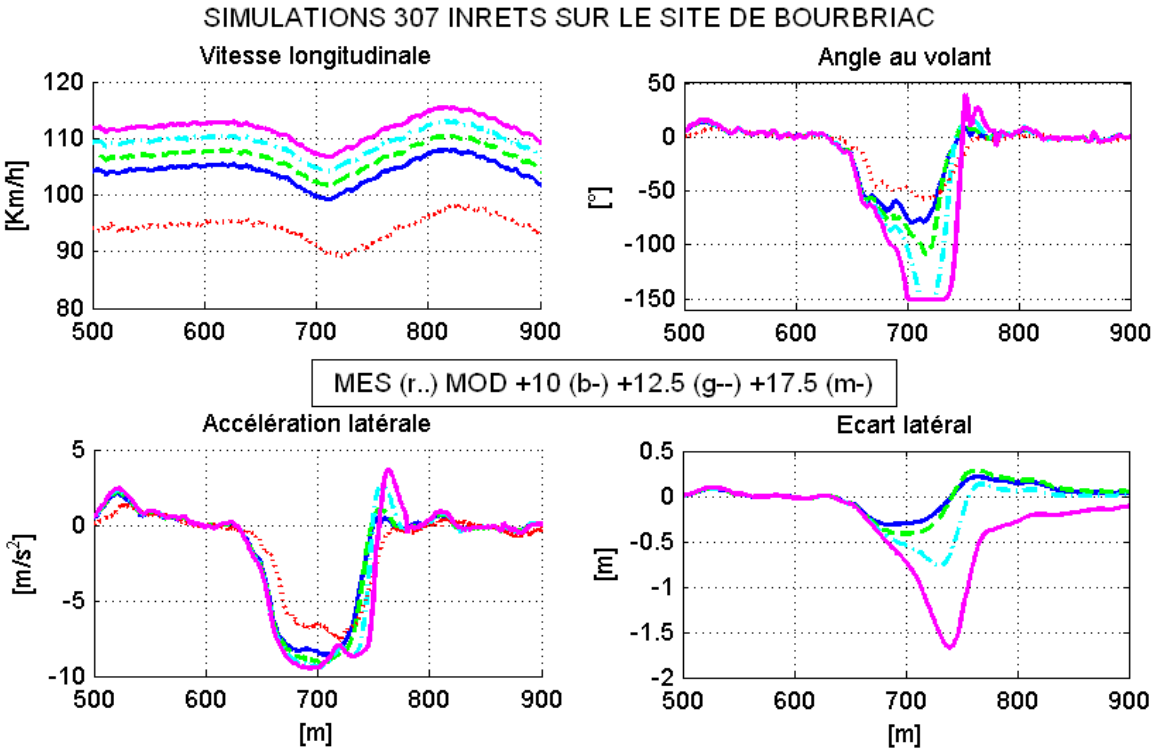


Figure 2 - Mise en oeuvre de DIARI sur le site de Bourbriac : données mesurées sur la voiture (en rouge) et issues des extrapolations : c'est la vitesse de 104 km/h (cyan) qui est considérée comme la limite, au-delà l'écart latéral dépasse 1m par rapport à la consigne.

Notre démarche est d'utiliser dans un premier temps des incréments de vitesse de 10, 20 et 30 km/h sur la base des 2 essais les plus sollicitants réalisés sur chacun des sites. Une fois que la rupture a été cernée dans une plage de 10 km/h, nous avons cherché à l'identifier de manière plus précise en effectuant un rejeu à l'intérieur de cette plage avec des incréments de vitesse de 2.5, 5 et 7.5 km/h. Les résultats de cette dernière simulation sont présentés à la figure 2, pour le site de Bourbriac : on en déduit une vitesse de franchissement limite de 104 km/h. Au-delà on considère que le sous-virage se traduit par un écart trop important par rapport à la consigne de trajectoire. Ces résultats sont davantage détaillés dans Lechner et al. (2009).

Pour les trois sites, on peut retenir des vitesses de franchissement limites de 104 km/h pour Bourbriac, 120 pour Callac et 130 km/h pour Rostrenen, qui correspondent à la vitesse au-delà de laquelle une perte de contrôle va se produire, en tenant compte des hypothèses modélisées : chaussée sèche, véhicule 307 en bon état, équipé de pneumatiques performants et correctement gonflés.

3.3 Variantes concernant le véhicule, le conducteur et l'infrastructure

Position du problème

Si les résultats donnés ci-dessous sont forcément en partie liés aux caractéristiques dynamiques du véhicule d'essai, le principe d'extrapolation virtuelle vers la perte de contrôle est sans limite, et permet potentiellement de tester toute variante envisageable au niveau des paramétrages des modèles. Le point fort de l'application DIARI est en effet qu'à partir du moment où elle repose sur une modélisation détaillée et précise des trois composantes du système véhicule-conducteur-infrastructure, elle permet d'intégrer n'importe quelle variante sur l'un ou l'autre paramètre de l'une ou plusieurs de ces trois composantes, dans la mesure où l'on sait modéliser de façon valide cette variante d'hypothèse.

Nous allons illustrer ce point, sur la base de rejeux effectués à partir de la vitesse limite évaluée pour le site de Bourbriac au paragraphe précédent, pour chacune des trois composantes du système à travers respectivement :

- Pour le véhicule : le test de l'influence de la pression de gonflage des pneumatiques,
- Pour le conducteur : le test d'une variante de vitesse de braquage du volant,
- Pour l'infrastructure : le test d'une adhérence sol mouillé en se basant sur les données de l'appareil Griptester tiré par l'appareil à grand rendement VANI (Gothié, 2005).

Influence de la pression de gonflage des pneumatiques

Nous disposions de variantes de caractérisation du modèle de pneumatique utilisé pour une pression de gonflage de 1.8 bar, au lieu des 2.4 bar de base. La figure 3 montre, dans sa partie gauche, comment se traduit cette variante en terme d'effort transversal. On remarque que les phénomènes ne sont pas homothétiques, mais que l'on observe plutôt des niveaux d'effort et de rigidité de dérive (pente à l'origine) supérieurs avec 1.8 bar de pression pour les faibles charges verticales, et supérieurs pour les fortes charges. Equipé d'une combinaison de pressions de gonflage avant/arrière de 1.8/2.4 bar, au lieu de 2.4/2.4, on constate (figure 4 gauche) que le véhicule possède un comportement davantage sous-vireur, d'où un braquage de l'automate qui augmente plus tôt et plus vite, et qui se traduit par un écart par rapport à la trajectoire de consigne plus important, qui atteint 1.2 au lieu de 0.7 m précédemment, pour la vitesse limite de 104 km/h identifiée à la pression de 2.4/2.4. On montre alors que pour rester à un écart latéral équivalent, il convient de descendre la vitesse limite de 1.5 km/h, soit une nouvelle vitesse limite de franchissement de 102.5 km/h avec ses pneumatiques avant sous-gonflés (figure 4 droite).

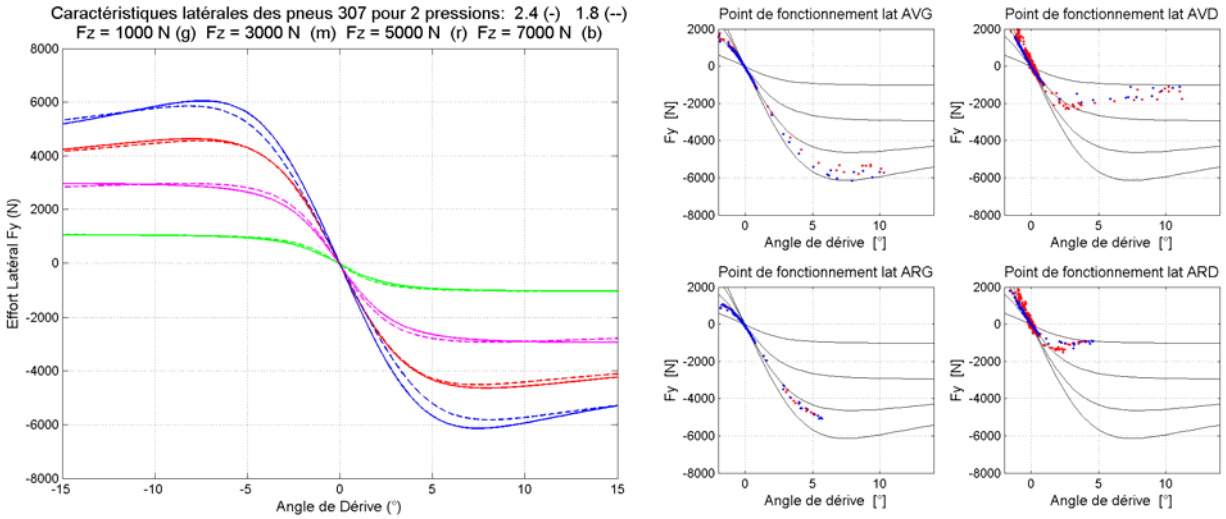


Figure 3 – Caractéristiques transversales des pneumatiques pour des pressions de gonflage de 2.4 et 1.8 bar (communiquées par Michelin au LCPC) à gauche – Comparaison des points de fonctionnement pour les configurations Av/Ar de 1.8/2.4 (rouge) et 2.4/2.4 bar (bleu) à droite

On note également sur la partie droite de la figure 3, qui présente les points de fonctionnement transversaux des pneumatiques, que c'est essentiellement la roue AVG surchargée, qui provoque cet excédent de sous-virage, le pneumatique AVD délesté, ayant au contraire tendance à générer un effort légèrement supérieur que lorsqu'il est correctement gonflé.

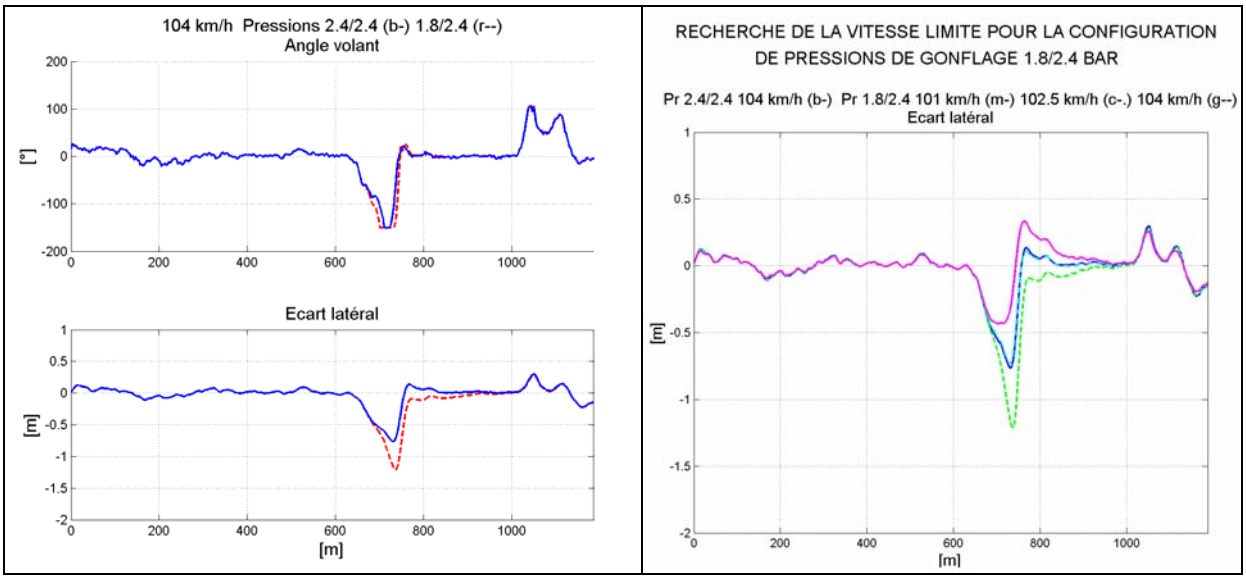


Figure 4 – Comparaison des commandes volant et des déviations latérales pour les configurations de pression Av/Ar de 1.8/2.4 et 2.4/2.4 : la vitesse limite admissible baisse de 104 km/h (partie gauche, avec un écart latéral supérieur à 1 m) à 102.5 km/h (partie droite)

Influence de la vitesse de rotation du volant

Nous avons montré (Lechner et Perrin, 1994, Lechner 2002) que les conducteurs, confrontés à une situation d'urgence, se différencient par leur capacité à appliquer des vitesses de rotation au volant plus ou moins élevées. Dans la version de base de l'automate, qui reproduit le comportement d'un conducteur assez performant, nous avons limité le braquage à 150° et la vitesse de rotation à +/-500°/s. Si on fait l'hypothèse d'un conducteur moins habile et plus lent, dont l'amplitude de braquage serait limité à 75° et la vitesse de rotation du volant à +/-250°/s

(figure 5 gauche), on constate (figure 5 droite) que l'écart latéral est alors de 1.20 m à 104 km/h et qu'il convient de descendre à 102.5 km/h pour avoir un déport équivalent de 0.7 m.

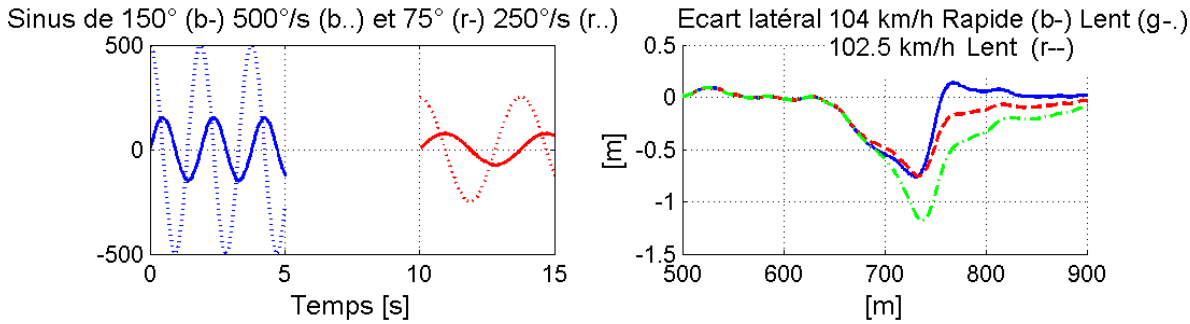


Figure 5 – Avec des commandes volant limitées à 75 ° et 250°/s , au lieu de 150° et 500 °/s, (comparaison à gauche sur un sinus), la vitesse limite admissible baisse de 104 à 102.5 km/h

Influence de l'adhérence du revêtement

Nous disposons sur les sites expérimentaux de SARI des relevés réalisés par le LRPC de Lyon avec l'appareil VANI, qui intègre une information d'adhérence fournie par un Griptester. Si on considère le cas d'une chaussée mouillée en faisant l'hypothèse que les caractéristiques du pneumatique sur chaussée sèche sont modulées par l'adhérence VANI, augmentée de 20 % pour ne pas obtenir de valeurs trop basses, on démontre que la vitesse limite de franchissement du site chute à 89 km/h, qui est la vitesse maximale à laquelle nous avons pu franchir ce virage sur chaussée sèche. Au-delà on aboutit à des trajectoires significativement trop éloignées de la trajectoire de référence, traduisant le sous-virage supérieur du véhicule.

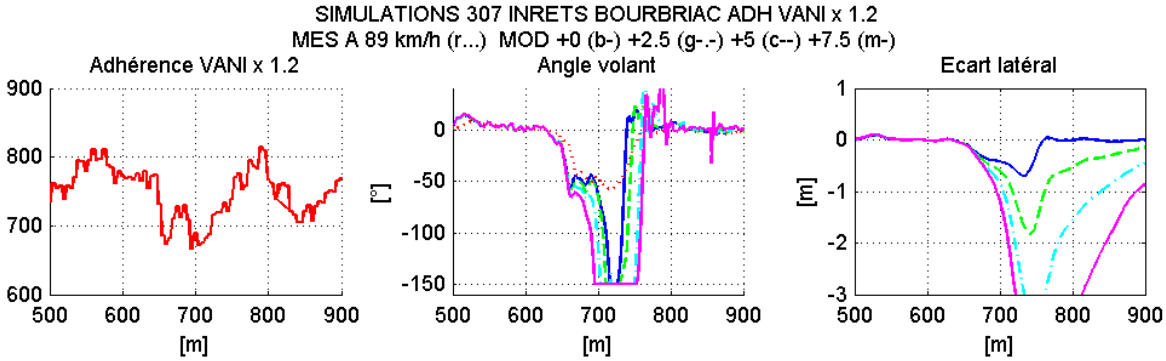


Figure 6 – Comparaison des commandes volant et des déviations latérales pour une adhérence chaussée mouillée (i.e. modèle sec modulé par 1.2 fois l'adhérence VANI) : la vitesse limite admissible baisse de 104 km/h à 89 km/h (en bleu sur la partie droite)

4. Conclusions et perspectives de déploiement

L'INRETS MA a réussi à développer tous les composants nécessaires au fonctionnement de cette ambitieuse application et les premiers résultats obtenus sont très prometteurs. Au-delà des améliorations possibles des modèles dynamiques et automates, certains approfondissements sont également envisagés :

- la création d'un module de fusion des différentes méthodes de détermination de la trajectoire de consigne,
- le complément des scénarios testés en y intégrant des erreurs de conduite (lever de pied, coup de frein en virage), ainsi que l'intégration du fonctionnement de l'ESP,
- l'amélioration des critères d'identification de la vitesse maximale sur un virage donné.

L'application DIARI tourne actuellement sur le véhicule laboratoire de MA sur un PC unique (Intel Core2 Duo à 3 GHz) avec d'autres application en parallèle (acquisition de 256 voies analogiques à 100 Hz et de plusieurs ports série, autres logiciels embarqués). La consommation de ce PC est de l'ordre de 10 A sous 12 V.

Notre objectif à terme est de déployer cette application sur un système embarquable d'un coût modéré, intégrant tous les composants nécessaires : capteurs, modèles dynamiques et modules logiciels associés, tel qu'EMMA2 développé par l'INRETS MA sous la forme d'un EDR (Figure 7), qui est un système de faible encombrement, de faible poids et d'une consommation électrique très réduite (300 mA sous 12 V).Les véhicules équipés, considérés comme des véhicules traceurs, pourraient être dans un premier temps mis en œuvre par des gestionnaires d'infrastructure (Conseil Généraux…) pour produire des connaissances plus riches sur les caractéristiques des itinéraires dont ils ont la charge, enrichir des bases de données routières ou alimenter des panneaux à messages variables. A plus long terme, lorsque les outils de communication inter-véhicules seront davantage matures, on peut également envisager qu'un véhicule équipé puisse communiquer ses informations aux usagers qui vont être confrontés, dans un futur immédiat, aux difficultés des itinéraires parcourus.

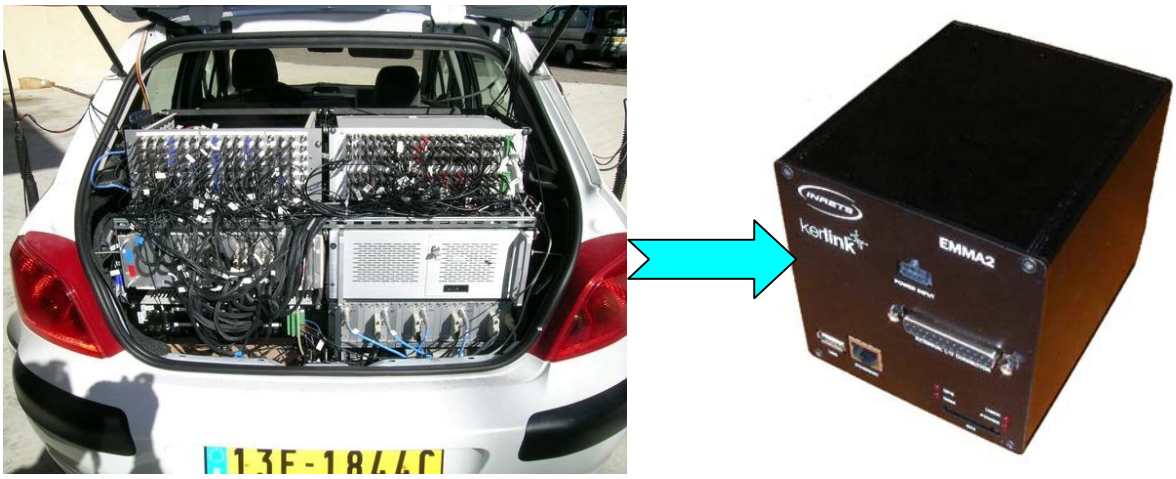


Figure 7 – Perspectives d'utilisation de DIARI : du prototypage sur le véhicule 307 de l'INRETS MA vers le déploiement sur le système EMMA2

Remerciements

Les auteurs remercient la DSCR pour le financement du programme RADARR de SARI dans le cadre du PREDIT, Marie-Line Gallenne pour la conduite de SARI, Yann GOYAT et Minh-Tan Do (LCPC) pour la conduite de RADARR et IRCAD respectivement. Les auteurs remercient également les autres membres de l'Équipe Dynamique des Véhicules de MA, Damien Thomas, Eugenio Barletta et Steve Belon pour leurs contributions aux travaux de DIARI, Olivier Bellot et Loïc Baqué pour la mise en œuvre du véhicule instrumenté Peugeot 307, Ronan Queguiner (ERA 33, St Brieuc) pour son accompagnement sur les sites de SARI, ainsi qu'Ali Charara (HEUDIASYC) pour le co-encadrement de la thèse de Lghani Menhour.

Listes des abbréviations

- DIARI: DIAgnostic de Rupture d'un Itinéraire
- SARI : Surveillance Automatisée des Routes pour l'Information des conducteurs et des gestionnaires
- PREDIT : Programme de Recherche et d'Innovation dans les Transports Terrestres

- RADARR : Recherche des Attributs pour le Diagnostic Avancé des Ruptures de la Route
- IRCAD : Informer des Risques de rupture de l'itinéraire en Conditions Atmosphériques Dégradées
- VANI : Véhicule d'ANalyse d'Itinéraires
- EMMA2 : Enregistreur eMbarqué des Mécanismes d'Accidents
- ESP : Electronic Stability Program
- EDR : Event Data Recorder (Enregistreur de Données des événements de la Route)
- HEUDIASYC : HEUristique de DIAgnostic des SYstèmes Complexes

Références

- Bayle P., Forissier J.F., Lafon S. (1993), "A new tyre model for vehicle dynamics simulations"**,** Automotive Technology International, pp. 193–198.
- Bouteldja, M. et Cerezo, V. (2010), « Méthodologie de détermination des vitesses limite de perte de stabilité des poids lourds en virage », actes de la conférence PRAC2010, eds. B. Jacob et ML. Gallenne, Paris, mai.
- « Crash Avoidance Metrics Partnership (CAMP) », (2004), Final Report of Enhanced Digital Mapping Project (EDMap), US Department of Transportation and NHTSA.
- Glaser S. (2004), « Modélisation et analyse d'un véhicule en trajectoire limite. Application au développement de systèmes d'aide à la conduite », Thèse, Univ. d'Evry Val d'Essonne.
- Gothié M. (2005), « Les mesures de l'adhérence des chaussées en France et leur interprétation », Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, vol. 255.
- Gothié M. (2008), « Etat de mouillage critique ». Livrable Projet IRCAD 3-2A.
- Khemoudj, O., Imine, H. et Djemaï, M. (2010), « Nouvelle approche pour l'estimation des forces d'impact d'un poids lourd », actes de la conférence PRAC2010, eds. B. Jacob et ML. Gallenne, Paris, mai.
- Lechner D., Perrin C. (1994), « Limites de performances du couple conducteur-véhicule ». Papier SIA 94.06.24 - Congrès SIA Dynamique du Véhicule.
- Lechner D., Delanne Y., Schaefer G., et Schmitt V. (1997), « Méthodologie de validation du logiciel de dynamique automobile CALLAS », Papier SIA 970202, Congrès SIA Dynamique du véhicule. Reprint in "Ingénieurs de l'Automobile", N°713.
- Lechner D. (2002), « Analyse du comportement dynamique des véhicules routiers légers - Développement d'une méthodologie appliquée à la sécurité primaire », Thèse de Doctorat, Spécialité Mécanique, Ecole Centrale de Lyon, 463 p.
- Lechner D. (2003), « Apport de la dynamique des véhicules à la prévention des pertes de contrôle ». Congrès SIA Dynamique du véhicule, in "Ingénieurs de l'automobile", n°763.
- Lechner D. (2008), "Embedded laboratory for vehicle dynamic", AVEC, Kobe, Japan.
- Lechner D., Menhour L., Naude C., Thomas D., Barletta E. (2009), "Rupture diagnosis on an itinerary: a tool to improve road safety**",** Congrès SIA Dynamique du véhicule.
- Menhour L., Lechner D. and Charara A. (2009), « Steering Control Based on a Two-Level Driver Model: Experimental Validation and Robustness Tests », IEEE-MSC, RUSSIA.
- Menhour L., Lechner D. and Charara A. (2010), "Two degrees of freedom PID multi-controllers to design a mathematical driver model: Experimental validation and robustness tests**".** Vehicle System Dynamics, à paraître.
- Sentouh, C., Glaser, S., Mammar S. (2006), "Advanced vehicle-infrastructure-driver speed profile for road departure accident prevention", Vehicle System Dynamics Supplement, Vol. 44, p.612-623.
- Schaefer G., Lechner D., Naude C. (2003), « Sécurité des poids lourds au renversement **».** Congrès SIA Dynamique du véhicule.

L'ISRI-CAM : UNE INNOVATION UTILE A LA DEMARCHE ISRI

Gilles BLANCHARD
CETE de l'Ouest/DES/Groupe Sécurité Routière
Nantes, France

Rodolphe CHASSANDE-MOTTIN
Service d'études sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements (Sétra)
Bagneux, France

Xavier BERTRAND
CETE de l'Ouest/CECP d'Angers
Angers, France

Résumé
L'ISRI-Cam est une innovation technique construite pour assister les inspecteurs de la démarche ISRI dans leurs relevés. Cette réalisation du CETE de l'Ouest avec le SETRA est destinée aux différents gestionnaires de réseaux routiers. Simple d'utilisation, l'ISRI-Cam comprend une caméra miniature, un GPS, un microphone et se raccorde facilement à un microordinateur portable par une prise USB.

Mots-clefs: sécurité routière, connaissance des accident, géomatique, infrastructure

Abstract
ISRI-Cam is a an innovative tool designed by the CETE of Nantes with the SETRA. It aims to help the ISRI inspectors. ISRI is a new Road Safety approach of the French Ministry of Ecology, Energy, Sustainable Development and the Sea in support of green technologies and climate change negotiations which aims to develop preventive measures to improve road safety on our roads.

Keywords: Road Safety, Accident Knowledge, Geomatic, Infrastructure

1. Introduction

Les conditions de l'innovation sont multiples. Comme le souligne Galenne (2008) dans « Valorisation et perspectives pour les outils de diagnostic en sécurité routière » réalisé dans le cadre de l'Opération de Recherche sur le Risque Routier, la boucle entre besoins et propositions est souvent la clé de la création de nouveaux outils opérationnels.
Et le projet que nous allons décrire est une illustration de la fécondité potentielle des échanges entre les utilisateurs et les chercheurs.

Ensuite l'innovation peut être spectaculaire ou d'apparence plus modeste. Ce nouveau matériel s'appuie sur de nombreux progrès technologiques récents (géolocalisation, miniaturisation,...) en les mettant au service de besoins identifiés.

Au départ il y a un projet national d'Inspection de Sécurité Routière des Itinéraires (ISRI) du Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer en charge des Technologies vertes et des Négociations sur le climat (MEDDM). Cette démarche nouvelle répond au souci de l'État de compléter les actions d'amélioration du réseau en terme de sécurité routière dans un cadre conforme avec une récente Directive Européenne sur la sécurité routière. Le cœur de ce projet est de s'inscrire dans une démarche préventive organisée à partir de l'usager. Elle est complémentaire à d'autres démarches existantes plus normatives.

L'outil Isri-Cam est une assistance technique conçue, pour la démarche ISRI, en fonction de besoins d'assistance identifiés. Cet appareil est destiné à renforcer l'efficacité de ces inspections ISRI. L'outil n'a pas forcé la méthodologie, il s'y est adapté.

2. Contexte

La directive européenne du 19 novembre 2008 concernant la gestion de la sécurité des infrastructures routières prescrit une série de procédures dont la mise en œuvre d'un système d'inspections de sécurité du réseau routier existant.

En cohérence avec cette directive européenne, la France disposait fin 2009, sur le Réseau Routier National (RRN), de trois démarches globales d'amélioration de la sécurité des infrastructures routières :
- pour les nouveaux projets routiers, le CSPR (Contrôle de Sécurité des Projets Routiers) agit tout au long du processus de conception ;
- pour les routes existantes, la démarche SURE (Sécurité des Usagers sur les Routes Existantes) intervient prioritairement là où une accidentalité importante a été observée ;
- la récente démarche ISRI (Inspections de Sécurité Routière des Itinéraires) s'applique sur l'ensemble du réseau routier national de manière systématique, de manière préventive quelque soit l'accidentalité.

A ces trois démarches viendra s'ajouter en 2010 une démarche d'étude des incidences sur la sécurité routière des différents projets d'infrastructure.

La figure 1 présente l'articulation de ces différentes démarches d'amélioration de l'infrastructure routière en France.

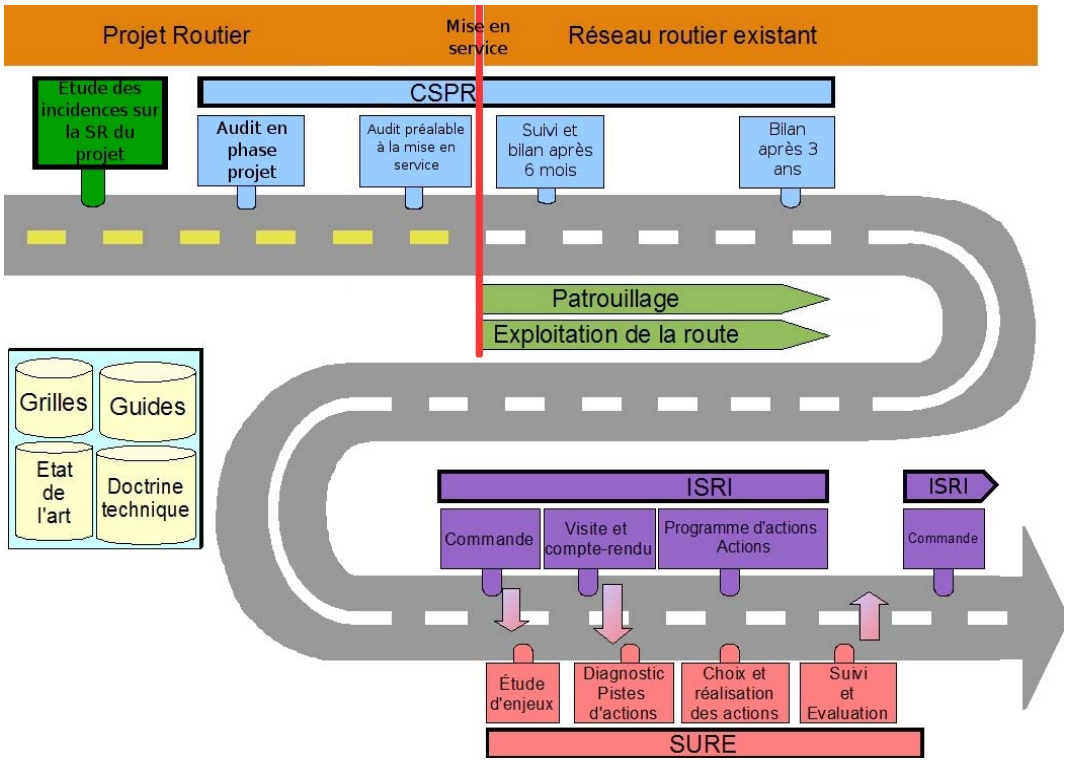


Figure 1 - Articulation des différentes démarches globales d'amélioration de la sécurité des infrastructures routières - Source : Sétra/CSTR/DESD/RCM

3. La genèse et principes de la démarche ISRI

La démarche ISRI a été initiée en février 2007 par deux administrations centrales du ministère MEDDM : la direction des infrastructures de transport (DIT) et délégation à la sécurité et à la circulation routières (DSCR). Cette commande confiait au SETRA le pilotage de l'élaboration d'une démarche d'inspection systématique et récurrente du réseau routier national.

Jusqu'au printemps 2008, un groupe projet a réalisé un état des lieux des recherches, connaissances utiles à ce projet. Puis à partir d'inspections expérimentales qui ont permis de tester, préciser les choix méthodologiques envisagés, une méthodologie a été déterminée.

Ces travaux ont été partagés en octobre 2008 avec la publication du guide "Démarche ISRI : Inspections de Sécurité Routière des Itinéraires" édité par le Sétra. Il est gratuitement téléchargeable sur le site Internet du Sétra : http://www.setra.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/0850w_Guide_ISRI.pdf

Cette démarche ISRI est désormais mise en oeuvre dans toutes les Directions Interdépartementales des Routes (DiR) gestionnaires du réseau national.

4. Principes de la démarche ISRI

La conception d'une infrastructure est guidée et encadrée par une série de normes, guides techniques, fiches techniques, recommandations... L'application de ces règles fait aussi l'objet de contrôles réguliers. Cependant, cette route « normée », adaptée au véhicule peut parfois devenir délicate pour l'usager dans sa tache de conduite. Les travaux de Van ESLANDE en 1997,

montrent par exemple que dans les accidents corporels, l'analyse de l'erreur humaine a, dans 74 % des cas, un lien avec une défaillance dans la saisie ou l'analyse de l'information.

La démarche ISRI a donc fait le choix de vérifier l'adaptation de l'infrastructure à l'usager. Elle ne vise pas à vérifier l'application de la norme mais à se mettre en situation d'usager pour relever des situations pouvant favoriser une insécurité routière. Il ne s'agit donc pas d'une inspection au sens littéral du terme, c'est à dire d'un contrôle extérieur avec examen attentif des itinéraires sous forme de contrôle hiérarchique. Il s'agit plutôt de l'apport d'un regard préventif, complémentaire au gestionnaire, neuf, simple et porteur de sécurité routière.

Ces constats sont proposés au gestionnaire comme une piste préventive d'amélioration de la sécurité routière de son réseau. C'est une « vigilance sécurité» sur la route qui est ainsi favorisée.

Il n'existe pas de liste exhaustive des évènements relevés lors des inspections ISRI. Mais par exemple un panneau d'entrée en agglomération dont le positionnement n'a pas de cohérence avec son environnement et sans variation du profil en travers peut constituer une difficulté de compréhension pour l'usager. De même la sur-abondance de panneaux ou à l'inverse un manque (panneaux non nécessaires suivant la norme mais suscités par certaines caractéristiques locales), la présence d'obstacles latéraux, une rupture de jalonnement, le changement de dénomination sur un cheminement de signalisation directionnelle,... constituent aussi d'autres exemples d'évènements ISRI (Figure 2).

Confusion panneaux sens interdit et panneaux stop	Excès de panneaux	Carrefour et affectation de voies peu lisibles	Positionnement du panneau d'agglomération

Figure 2 - Exemples d'évènements ISRI – Source SETRA guide méthodologique - démarche ISRI

Les différentes expérimentations ont montré une fréquence moyenne de relevés supérieure à un événement par kilomètre !

5. Utilité d'un outil d'aide

5.1 Description des taches à effectuer

Concrètement, ces inspections seront réalisés par une équipe de deux inspecteurs, formés à cette démarche, dans un véhicule léger sur un itinéraire, dans les deux sens de circulation, une fois de jour et ensuite une fois de nuit. Ces inspecteurs circulent à une vitesse normale en relevant les évènements de l'infrastructure et de son environnement qui leur semblent avoir des liens avec la sécurité routière. Pour réaliser ce relevé, ils peuvent s'appuyer sur un topomètre embarqué, un appareil photo numérique, un cahier de prise de note et éventuellement un dictaphone.

Ce type de relevé présente dans la pratique quelques contraintes ergonomiques alors même que l'accompagnateur est un intervenant actif dont le rôle ne se limite pas à une prise de note mais

complète la veille du conducteur vis-à-vis de l'environnement rencontré. Les contraintes suivantes ont été identifiées :

- pour chaque événement relevé, il faut à minima noter ses caractéristiques, la valeur du topomètre et éventuellement prendre une photographie ;
- plusieurs évènements simultanés peuvent se présenter ;
- en circulation, le temps de préparation de l'appareil photo est souvent trop long pour permettre de prendre des photographies alors même que la présence d'une photographie générale attachée à chaque observation est une illustration utile à la compréhension du relevé ;
- s'arrêter peut poser des problèmes de sécurité (comment faire une marche arrière ? Existe t-il une BAU, redémarrage délicat en cas d'arrêt sur un accotement non stabilisé ou en cas de fort trafic...) ;
- la prise de note manuscrite en circulant reste un exercice inconfortable et l'usage du dictaphone n'est pas totalement satisfaisant dans son exploitation (délai de dépouillement parfois long).

Enfin pour la rédaction du rapport à transmettre au gestionnaire :

- l'insertion des différentes photographies dans le document peut être fastidieuse : on récupère une série de photographies automatiquement numérotées qu'il faut ensuite arriver à localiser précisément (risque d'erreur possible) et ensuite insérer manuellement dans un tableau ;
- la retranscription de notes rapides peut aussi présenter le risque d'une perte de précision.

Dans ce contexte, il nous a semblé qu'un système simple, de première utilité, permettant une prise de photographie instantanée, l'enregistrement d'un commentaire audio associé et le tout géolocalisé pour être ensuite intégré automatiquement dans un pré-rapport au format ISRI, constituerait une aide appréciable générant un gain de productivité important.

6. L'Isri-Cam

La démarche ISRI est une une méthode simple et pragmatique. Il était donc indispensable que tout outil d'aide ne vise qu'à simplifier les taches des inspecteurs.

L'ISRI'Cam a ainsi été conçu, dans l'esprit de cette démarche, comme un outil simple à installer, simple à utiliser et ne mobilisant pas l'attention des inspecteurs afin de ne pas nuire à la qualité des visites et l'approche « on se met à la place de l'usager ».

6.1 Description de l'outil

L'équipement ISRI'Cam est constitué :

- d'un PC portable sur lequel le logiciel ISRI'Cam est installé,
- d'appareils d'acquisition vidéo, audio et de localisation GPS,
- d'équipements permettant l'installation à bord du véhicule et le confort de l'utilisateur.

Les appareils connectés au PC portable sont :

- une caméra numérique couleur (prise USB) et son objectif permettant l'acquisition d'images,
- un combiné récepteur/antenne GPS (prise USB) permettant la localisation du véhicule,
- un casque muni d'un micro permettant l'enregistrement de commentaires audio,
- un convertisseur électrique 12V/230V permettant l'alimentation électrique du PC portable.

Les équipements sont facilement installés à bord du véhicule et permettent de s'adapter à tout type de configuration de l'habitacle. Le PC portable est placé sur un coussin ergonomique afin d'assurer le confort de l'inspecteur (Figure 3). L'ensemble constitue le système d'acquisition (Figure 4).

Figure 3 - L'outil ISRI'Cam installé dans un véhicule

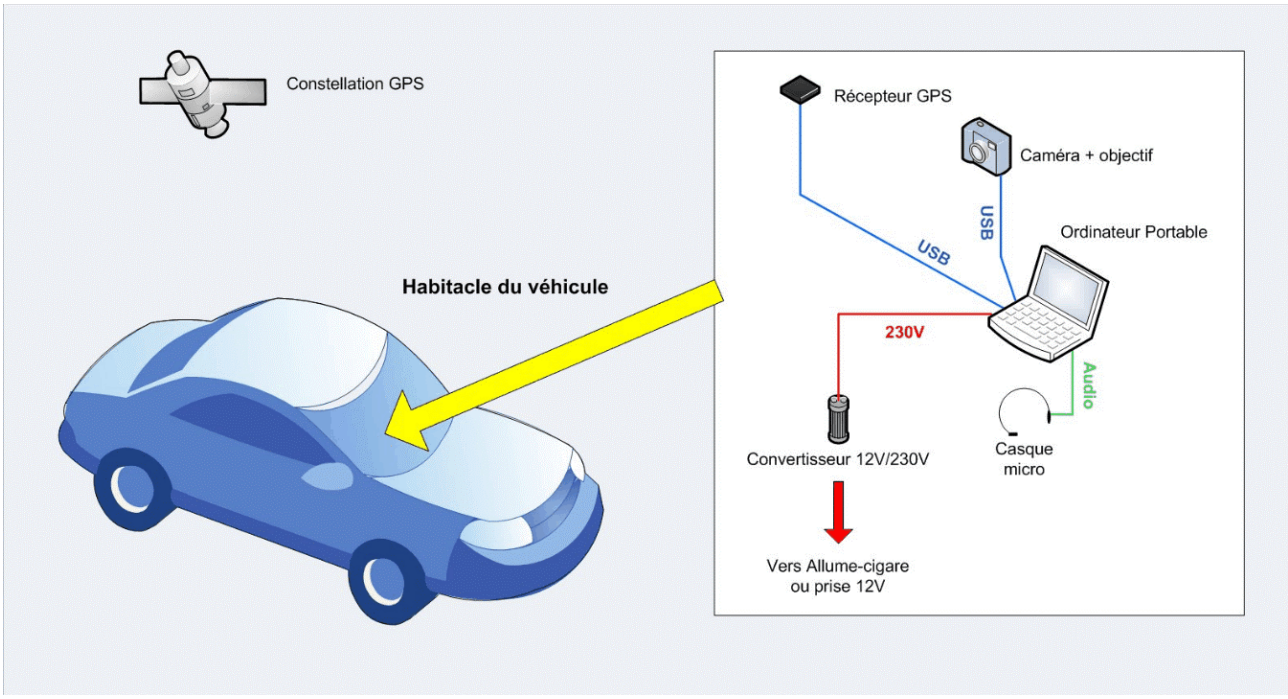


Figure 4 - Schéma synoptique du système d'acquisition

Un logiciel ISRI-Cam assure la commande des différents matériels d'acquisition de données en produisant à l'issue de l'inspection un document synthétique directement exploitable à l'aide d'un outil de traitement de texte libre (Open Office).

6.2 Description des fonctionnalités

En début de visite l'inspecteur renseigne une série de champs permettant l'identification de la

visite dans le rapport produit. Ensuite, au cours de la visite, l'utilisateur d'ISRI'Cam peut déclencher l'enregistrement d'un événement en appuyant sur la barre espace du microordinateur portable.

Le logiciel ISRI'Cam réalise pour chaque déclenchement :

- une photographie instantanée de la scène,
- un enregistrement du commentaire audio de l'inspecteur,
- un relevé de position GPS,
- un enregistrement de la distance parcourue par le véhicule depuis le début de la visite.

A l'issue de la visite, un pré-rapport ISRI est généré automatiquement. Celui-ci contient un tableau de tous les événements indexés, leur position, la miniature de l'image correspondante et dans une colonne supplémentaire : le fichier audio enregistré sur le disque dur est directement accessible en lecture par un simple clic sur la figurine associée à l'évènement de la colonne audio (lien hypertexte) (Figure 5).

n°	PR	Km véhicule	Relevé[1]	Commentaires	Critère(s) SRR[2] impacté(s)	Photos miniatures	Actions envisagées	Audio
1		981.22 m	Entrée d'agglomération MIGNALOUX masquée par panneau de police et végétation	Importance EB10	V			
		1389.01 m	Multiples gènes à la perception du feux tricolores		V et L			
		1791.60 m	En agglomération : Aménagement correspondant à de la rase campagne	Cohérence des limites d'agglomération	C			
		2524.98 m	Panneau de chantier mal entretenu, exemple feux de l'AK5 un seul éclat					

Figure 5 - Extrait du tableau d'évènements inséré dans le pré-rapport d'inspection

Pour la rédaction de leur compte-rendu, les inspecteurs peuvent ainsi réécouter leur description orale des évènements de façon à renseigner les rubriques « relevé », « commentaires », « critère(s) SSR impacté(s) » directement depuis le pré-rapport. Ensuite, cette colonne est supprimée pour ne pas apparaître dans le rapport final fournit au gestionnaire.

6.3 Bilan des premières expérimentations

Afin de fiabiliser cet outil, plusieurs inspecteurs ISRI (non membres de l'équipe de conception) ont accepté de tester cet outil.

La première phase de ces expérimentations a permis de tester, améliorer et fiabiliser l'outil.

Le calcul de l'abscisse curviligne a été un point de vigilance particulier. En effet celle-ci est indispensable au repérage des évènements sur l'itinéraire. Néanmoins, la précision des pointages réalisés en circulation et l'existence d'aléas sur la trajectoire inhérents à un véhicule en circulation (dépassement de véhicules, basculement de chaussée,...) n'exigeait pas une précision excessive.

Un module de calcul de cette abscisse à partir des données GPS recueillies a été conçu. Les essais réalisés mettent en évidence la qualité de la précision de cette estimation de l'abscisse curviligne, d'un niveau cohérent avec l'objectif de la démarche ISRI'Cam. Un exemple de valeurs obtenues sur un itinéraire test confirment un niveau d'écart avec des données cartographiques inférieur à 2m/km parcouru (Tableau 1).

Tableau 1 - Comparaison des mesures de l'abscisse curvilignes avec la longueur de l'itinéraire

Repère	Distance cumulée (m)		Ecart (m)	Distance inter-repères (m)		Ecart (m)
	ISRI'Cam	Cartographie		ISRI'Cam	Cartographie	
1	0	0	0	0	0	0
2	104.2	104.2	0	104.2	104.2	0.0
3	504.1	503.4	0.7	399.9	399.3	0.6
4	568.1	567.3	0.8	64.0	63.8	0.2
5	1193.7	1192.3	1.4	625.6	625.1	0.5
6	1847.3	1845.4	1.9	653.7	653.0	0.7
7	2358.3	2355.4	2.9	510.9	510.0	0.9
8	2953.3	2949.9	3.4	595.0	594.5	0.5

Ces « inspections-test » ont permis de vérifier les choix de la phase de conception mais aussi de réaliser certains ajustements justifiés par une meilleure adaptation aux contraintes des visites ISRI. Les inspecteurs ont aussi souligné :

- la facilité d'installation et de prise en main,
- le confort et l'ergonomie du système,
- la rapidité de déclenchement des photographies,
- la qualité des enregistrements audio et la possibilité donnée au conducteur de participer activement,
- la traçabilité des informations recueillies : à chaque événement, correspond une image, un fichier son, une position, une distance parcourue,
- la liberté d'action donnée par la possibilité de modifier à volonté le rapport édité.

Ensuite, la seconde phase de ces expérimentations a compris des tests en situation réelle d'inspection ISRI commandés par un gestionnaire.

En comparaison avec le déroulement habituel des visites sans ISRI'Cam, la simplification de la tache de relevé des évènements a été confirmée. A bord du véhicule, les inspecteurs peuvent effectivement se consacrer plus totalement à l'objectif de leur visite qui est le relevé d'évènements et non pas leur transcription immédiate.

Les inspecteurs ont également bien utilisé la possibilité de relever des évènements complémentaires de repérage (PR, carrefours, giratoires, etc) utiles à la rédaction du rapport et à

la communication avec le gestionnaire. On pressent également une conséquence initialement imprévue de cet outil : la facilité procurée par l'outil semble favoriser une plus grande attention et sensibilité des inspecteurs à leur environnement ce qui génère une meilleure densité des évènements relevés.

Tableau 2 - Véritables inspections réalisées avec l'ISRI-Cam

Service gestionnaire	Site inspecté	Longueur	Noms inspecteurs	Nombre d'évènements ISRI relevés
DiR Centre-Ouest	N147 – N145 (Vienne	103 km	Daniel DANG Loïc LE POULICHET	Sens des PR croissants : 206 évènements (et 55 évènements de repérage) Sens des PR décroissants : 55 évènements (et 46 évènements de repérage)
DiR Ouest	RN165 (Finistère)	114 km	Rémy DURAND Jean Claude PANNETIER	Sens + : 81 évènements Sens - : 71 évènements
DiR Ouest	RN 265 (Finistère)	6 km	Rémy DURAND Jean Claude PANNETIER	Sens des PR croissants : 9 évènements Sens des PR décroissants : 10 évènements

7. Conclusion

Cet article présente les résultats d'une recherche technique faisant le lien entre une nouvelle démarche porteuse de sécurité routière et les possibilités d'aide apportées par de nouvelles technologies (miniaturisation des caméras, GPS et logiciels d'utilisation de ces appareils).

Ce projet a bénéficié d'une mobilisation efficace de l'ensemble des intervenants en permettant de passer de l'expression de l'idée, formalisée par la rédaction d'un cahier des charges fin 2008, à la diffusion d'un produit opérationnel (25 équipements) auprès de l'ensemble des Direction Inter départementales des Routes en avril 2010.

L'informatisation de ce relevé rendra également possible, si nécessaire, l'intégration de ces données dans un système d'information géographique (SIG) ou aussi la constitution d'une base nationale de données géolocalisées des relevés d'évènements ISRI.

Références

- Chassande-Mottin, R. (2009) « Inspections de Sécurité Routière des Itinéraires : bilan après neufs mois de déploiement », FACES Bulletin N°47 - novembre 2009, 10-12
- Gallenne, M-L. (2008) « Valorisation et perspectives pour les outils de diagnostic en sécurité routière » - Diaporama Opération de Recherche Risque Routier
- Gallenne, M-L., Fournier, P. (2007) « SARI : un bel exemple de partenariats entre les collectivités territoriales et les organismes de recherche du RST », T.E.C.n° 194, 21-27)
- SETRA (2003), Contrôle de sécurité des projets routiers. Audit avant mise en service - Guide méthodologique, Bagneux

- SETRA (2006), Démarche SURE - Sécurité des usagers sur les routes existantes - Présentation et management, Bagneux
- SETRA (2008), Guide méthodologique - Démarche Isri -Inspections de Sécurité Routière des Itinéraires, Bagneux
- SETRA (2009), Évaluation du risque Routier par l'analyse de la lisibilité de la route
- SETRA-CETUR (1992) « Sécurité des Routes et des Rues », Bagneux
- Van Eslande, P. et Alberton, L. (1997) - Scénarios-types de production de l'erreur humaine dans l'accident de la route, problématique et analyse qualitative. Rapport INRETS , n° 218, 179 p.

ESTIMATION TEMPS RÉEL DES EFFORTS LATÉRAUX ET DE LA DÉRIVE D'UN VÉHICULE, VALIDATION EXPÉRIMENTALE

M. DOUMIATI
Gipsa-INPG
UMR CNRS 5216
Grenoble, France

A. VICTORINO **A. CHARARA**
HEUDIASYC UMR UTC-CNRS 6599
Compiègne, France

D. LECHNER
INRETS-MA
Salon de Provence,
France

Résumé
La connaissance de certains paramètres fondamentaux de la dynamique de véhicules, tels que, les efforts de contact pneumatiques/chaussée, l'angle de dérive et l'adhérence, est indispensable dans des processus d'assistance au conducteur ou de contrôle. Ces variables ne sont pas disponibles sur les véhicules de série, par conséquence elles doivent être estimées. L'observateur d'état (capteur logiciel) proposé, dans cette étude, est de type filtre de Kalman. Il est basé sur la réponse dynamique d'un véhicule, équipé par des capteurs standards. Cet article décrit le procédé d'estimation et présente des évaluations expérimentales. Les résultats expérimentaux acquis avec le véhicule du laboratoire INRETS-MA prouvent l'exactitude et le potentiel de cette approche

Mots-clés: Dynamique du véhicule, forces d'interaction pneumatique/chaussée, angle de dérive, observation d'état.

Abstract
A certain number of parameters describing the vehicle dynamics, as the wheel-road contact forces, the side slip angle and the friction coefficient, are important at the drive assistance systems or control scheme. These variables are not available in standard vehicles, and must be estimated. We propose in this article, observers that estimate the wheel-road contact forces and the side slip angle. These observers are based on the Kalman filter techniques, and taking into account the dynamic response of a vehicle equipped with standard sensors. We present the estimation process and experimental results showing the validity of the approach. Experimental tests were realized using the vehicle from the INRETS-MA laboratory.

Keywords: Vehicle dynamics, wheel-road contact forces, side slip angle, state observers.

1. Introduction

Les différentes études montrent que la plupart des accidents de route est due aux erreurs de conduite (Aparicio, 2005). La grande majorité des conducteurs a peu de connaissance sur le comportement dynamique, pour cela des systèmes d'aide à la conduite sont essentiels dans le contrôle du véhicule sur la route. Dans ce contexte, plusieurs systèmes de sécurité active ADAS (Advanced Driver Assistance Systems) existent, tels que les systèmes de freinage ABS ou de contrôle de trajectoire de type ESP. La vitesse longitudinale, les accélérations, les débattements de suspension, la vitesse du lacet et les angles de braquage sont des variables facilement mesurables à l'aide des capteurs à faible coût, effectivement installés sur une grande gamme de véhicules récents. En revanche, d'autres paramètres fondamentaux pour l'amélioration de la sécurité et la maniabilité du véhicule, comme les efforts de contact pneumatiques/chaussée et l'angle de dérive, ne sont mesurables qu'avec des capteurs très onéreux, ce qui donne tout son intérêt à cette approche de « capteurs virtuels ou logiciels ». Comme le mouvement du véhicule est gouverné par les forces générées entre les pneus et la route, la connaissance de ces efforts est cruciale pour prévoir la trajectoire du véhicule. Ainsi, lors d'un virage, des angles de dérives s'établissent et les pneumatiques répondent par des efforts latéraux qui font tourner le véhicule dans le sens souhaité par le conducteur. Une courbe caractéristique typique du comportement transversal d'un pneumatique est présentée sur la figure 1(a). On y distingue trois régions : linéaire avec un coefficient de proportionnalité C_α, transitoire et saturation ou glissement. En situation de conduite normale, lorsque le pneumatique est faiblement sollicité (régime linéaire : petites valeurs de dérive), le véhicule répond d'une façon prévisible par rapport aux commandes du conducteur. Par contre, quand le véhicule est soumis à de fortes sollicitations latérales, les efforts se saturent, le véhicule atteint sa limite de stabilité et un risque de dérapage est prévu. De ce fait, des données précises sur ces efforts latéraux et sur l'angle de dérive, conduisent à une meilleure évaluation de l'adhérence de la route, des trajectoires possibles du véhicule et rendent possible le développement d'un outil de diagnostic capable de prévenir les risques d'accidents liés à des manœuvres dangereuses.

Dans la littérature, de nombreuses études sont dédiées à l'estimation des variables dynamiques d'une automobile. Plusieurs travaux ont été menés afin d'estimer les efforts pneumatiques/chaussée, la dérive et l'adhérence. Par exemple, dans Ray (1997), l'auteur estime des paramètres de la dynamique, en utilisant un modèle complexe de neuf degrés de liberté. Dans Stéphan et al (2004), l'estimation de l'angle de dérive a été largement discutée. Plus récemment, dans Baffet. et al (2008), les auteurs estiment les efforts latéraux par train et non pas au niveau de chaque roue. L'originalité de cette étude, par rapports à l'existant, est de développer un processus temps-réel capable d'estimer les efforts latéraux au niveau de chaque roue ainsi que l'angle de dérive au centre de gravité (cdg). De plus, ce processus d'estimation a été développé uniquement en fonction des capteurs disponibles en standard sur le véhicule. La deuxième section de cet article présente le processus d'estimation. La troisième section présente le modèle de véhicule et la dynamique de l'interface pneumatiques/chaussée. La quatrième section décrit l'observateur et présente une étude d'observabilité. La cinquième section fournit des évaluations expérimentales provenant d'un essai sur un véhicule expérimental. Finalement, la dernière section présente les conclusions et perspectives.

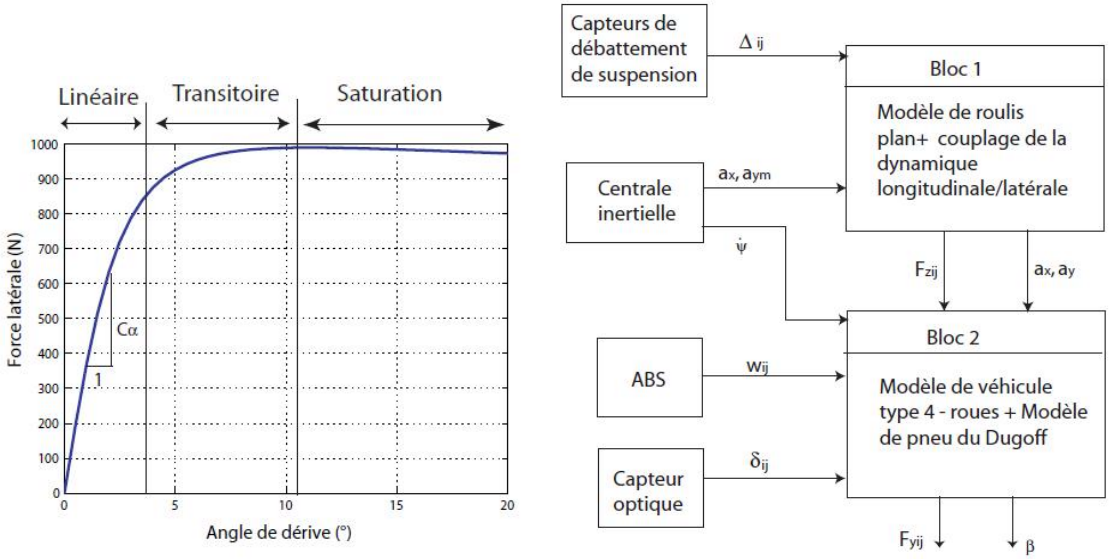


Figure 1 – (a) Caractéristique typique du comportement transversal d'un pneumatique; (b) Diagramme du processus d'estimation

2. Processus d'estimation

Le processus d'estimation est présenté dans sa totalité par le schéma bloc illustré sur la figure 1(b), où a_x et a_{ym} sont respectivement les accélérations longitudinale et latérale, $\dot{\psi}$ est la vitesse du lacet, Δ_{ij} (i = avant (1) ou arrière (2) et j = gauche (1) ou droite (2)) est le débattement de suspension, w_{ij} est la vitesse de la roue, F_{zij} et F_{yij} sont respectivement les forces normales et latérales du contact roues/sol, β est l'angle de dérive au cdg. Ce processus est séparé en deux blocs en séries, dont l'objectif est d'estimer les efforts verticaux et latéraux au niveau du contact pneumatiques/chaussée. Par conséquence, une évaluation de l'adhérence latérale sera possible. Le dispositif d'estimation nécessite les mesures suivantes :

- vitesse du lacet et les accélérations longitudinales et latérales, accessibles à partir d'une centrale inertielle ;
- débattements de suspension, mesurés par un capteur de débattement ;
- angle de braquage, mesuré par un capteur optique ;
- vitesses des roues, fournies par le système ABS.

Le rôle principal du premier bloc est de fournir la masse du véhicule, le transfert de charge et les efforts verticaux appliqués au niveau roues/sol, ainsi que l'accélération latérale corrigée relativement au roulis du véhicule, notée a_y. Ce bloc a été le sujet de nos études antérieures (Doumiati et al 2008). Cet article se focalise sur la description du deuxième bloc dont le but principal est d'estimer les efforts latéraux et la dérive. Ce deuxième bloc profite des estimations fournies par le bloc 1. La stratégie de séparation du problème en plusieurs blocs permet de le simplifier et d'éviter les problèmes d'observabilité, découlant d'une utilisation inappropriée de la modélisation complète du système.

3. Représentation du modèle véhicule/chaussée

3.1 Modèle du véhicule

Un véhicule automobile est un système complexe, les modèles analytiques qui le décrivent peuvent compter un nombre de variables très important. Il est nécessaire de réduire la complexité des modèles afin d'alléger les calculs et d'envisager une implantation temps-réel. Le modèle de

véhicule, choisi pour cette étude, est le modèle « 4-roues » représenté sur la figure 2, où $\dot{\psi}$ est la vitesse du lacet, β est l'angle de dérive au cdg, V_g la vitesse du véhicule au cdg, L_1 et L_2 sont les distances du cdg aux essieux avant et arrière, $F_{x,y,i,j}$ sont les efforts longitudinaux et latéraux, les δ_{ij} sont les angles de braquage des roues avant et arrière, et E est la voie du véhicule. C'est un modèle simple qui correspond suffisamment à nos objectifs. Il a été largement utilisé dans la littérature pour décrire le comportement dynamique transversal du véhicule. Le modèle sera simplifié pour les raisons suivantes :

- la non utilisation des mesures des couples des roues diminue l'observabilité du système ;
- l'estimation du glissement longitudinal est complexe à réaliser, car elle nécessite des estimations précises de la vitesse du véhicule et des rayons dynamiques des roues. Etant donné que ces informations ne sont pas disponibles avec une précision suffisante, l'estimation du glissement longitudinal est pour le moment inaccessible, en conséquence aucun modèle de force longitudinal ne sera utilisé.

Ces limitations mènent aux simplifications suivantes :

- les efforts longitudinaux arrière sont négligés relativement à ceux de l'avant (nous supposons que les roues motrices sont à l'avant du véhicule) ;
- l'ensemble des forces longitudinales est réduit à la somme des forces longitudinales avant $F_{x1} = F_{x11} + F_{x22}$;
- les angles de braquage d'avant sont égaux ($\delta_{11} = \delta_{12} = \delta$) et ceux d'arrière sont approximativement nuls ($\delta_{21} = \delta_{22} = 0$).

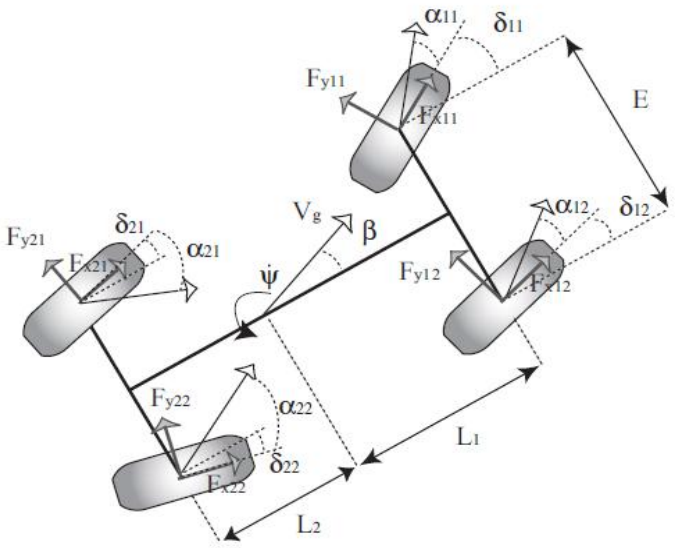


Figure 2 –Modèle du véhicule 4-roues

Les variables du modèle 4-roues simplifié évoluent alors selon les équations suivantes :

$$\dot{V}_g = \frac{1}{m}\left[\begin{array}{l} F_{x1}\cos(\beta-\delta) + F_{y11}\sin(\beta-\delta) + \\ F_{y12}\sin(\beta-\delta) + (F_{y21}+F_{y22})\sin(\beta) \end{array}\right],$$

$$
\begin{aligned}
\ddot{\psi} &= \tfrac{1}{I_z}\begin{bmatrix} L_1[F_{y11}\cos\delta + F_{y12}\cos\delta + F_{x1}\sin\delta] - \\ L_2[F_{y21}+F_{y22}] + \\ \tfrac{E}{2}[F_{y11}\sin\delta - F_{y12}\sin(\delta)] \end{bmatrix}, \\
\dot{\beta} &= \tfrac{1}{mV_g}\begin{bmatrix} -F_{x1}\sin(\beta-\delta) + F_{y11}\cos(\beta-\delta) + \\ F_{y12}\cos(\beta-\delta) + (F_{y21}+F_{y22})\cos(\beta) \end{bmatrix} - \dot{\psi}, \\
a_y &= \tfrac{1}{m}[F_{y11}\cos\delta + F_{y12}\cos\delta + (F_{y21}+F_{y22}) + F_{x1}sin\delta], \\
a_x &= \tfrac{1}{m}[-F_{y11}\sin\delta - F_{y12}\sin\delta + F_{x1}\cos\delta].
\end{aligned} \tag{1}
$$

où m est la masse du véhicule, I_z est le moment d'inertie autour de l'axe de lacet et α_{ij} les angles de dérives des roues avant et arrière.

La vitesse du véhicule V_g, les angles de braquage δ_{ij}, la vitesse de lacet $\dot{\psi}$ et la dérive au cdg β sont ensuite utilisés pour le calcul des angles de dérive des roues avant et arrière α_{ij}, où :

$$
\begin{aligned}
\alpha_{11} &= \delta - \arctan\left[\tfrac{V_g\beta + L_1\dot{\psi}}{V_g - E\dot{\psi}/2}\right], \\
\alpha_{12} &= \delta - \arctan\left[\tfrac{V_g\beta + L_1\dot{\psi}}{V_g + E\dot{\psi}/2}\right], \\
\alpha_{21} &= -\arctan\left[\tfrac{V_g\beta - L_2\dot{\psi}}{V_g - E\dot{\psi}/2}\right], \\
\alpha_{22} &= -\arctan\left[\tfrac{V_g\beta - L_2\dot{\psi}}{V_g + E\dot{\psi}/2}\right].
\end{aligned} \tag{2}
$$

3.2 Modèle de force latérale du contact pneumatique/chaussée

La modélisation des forces du contact pneumatique/chaussée est complexe car de nombreux phénomènes physiques interagissent, selon une multitude de caractéristiques environnementales et pneumatiques (charge appliquée, pression des pneus, revêtement de la chaussée…). La littérature est abondante en modèles du comportement dynamique du pneumatique. Nous distinguons des modèles physiques qui permettent de caractériser la surface de contact roue/sol (Canudas-De-Wit et al. 2003) et des modèles empiriques qui sont issus d'identifications des paramètres de courbes à partir de relevés expérimentaux obtenus sur banc d'essai (Dugoff et al. 1970). Le modèle de Dugoff a été retenu pour cette étude car il nécessite un nombre réduit de paramètres pour évaluer les efforts latéraux. C'est un modèle non linéaire, dont la forme simplifiée est donnée par :

$$F_{yij} = -C_{\alpha i} tan\alpha_{ij}.f(\lambda) \tag{3}$$

où $C_{\alpha i}$ est la rigidité de dérive et f(λ) est donnée par :

$$f(\lambda) = \begin{cases} (2-\lambda)\lambda, & \text{if } \lambda < 1 \\ 1, & \text{if } \lambda \geq 1 \end{cases} \tag{4}$$

$$\lambda = \frac{\mu F_{zij}}{2C_{\alpha_i}|tan\alpha_{ij}|} \tag{5}$$

Dans la formulation ci-dessus, μ représente le coefficient de frottement et F_{zij} est la charge normale appliquée au pneu ij. Ce modèle simplifié néglige l'effet des efforts longitudinaux (Hsu and Gerdes 2005).

3.3 Modèle de type longueur de relaxation

Lorsque l'angle de dérive varie, la force latérale correspondante est induite avec un retard. Ce comportement transitoire peut être formulé avec une variable appelée longueur de relaxation σ_i qui est la distance parcourue par le pneumatique durant la phase d'établissement de la force de contact pneumatique/chaussée. Le modèle de relaxation peut s'écrire de la façon suivante :

$$\dot{F}_{yij} = \frac{V_g}{\sigma_i}(-F_{yij} + \overline{F_{yij}}), \qquad (6)$$

où F_{yij} est calculé avec le modèle de référence de Dugoff.

4. Représentation d'état – Construction de l'observateur

Cette section présente une description de l'observateur dédié à l'estimation des forces latérales et de la dérive. La représentation d'état du modèle non linéaire véhicule/chaussée décrit dans la section précédente s'écrit :

$$\begin{cases} \dot{X}(t) &= f(X(t),U(t)) + b_m(t) \\ Y(t) &= h(X(t),U(t)) + b_s(t) \end{cases} \qquad (7)$$

Le vecteur d'entrée U comprend l'angle de braquage des roues et les forces normales estimées à partir du premier bloc (voir section 2) :

$$U = [\delta,\ F_{z11},\ F_{z12},,\ F_{z21},\ F_{z22}] = [u_1,\ u_2,\ u_3,\ u_4,\ u_5]. \qquad (8)$$

Le vecteur de mesure Y comprend la vitesse du lacet, la vitesse du véhicule (approximée par la moyenne des deux vitesses de translation des roues arrières, fournies par le système ABS), ainsi que les accélérations longitudinale et latérale :

$$Y = [\dot{\psi},\ V_g,\ a_x,\ a_y] = [y_1,\ y_2,\ y_3,\ y_4]. \qquad (9)$$

Le vecteur d'état X comprend la vitesse du lacet, la vitesse du véhicule, l'angle de dérive au cdg, les forces latérales, et la somme des forces longitudinales avant :

$$\begin{aligned} X &= [\dot{\psi},\ V_g,\ \beta,\ F_{y11},\ F_{y12},\ F_{y21},\ F_{y22},\ F_{x1}] \\ &= [x_1,\ x_2,\ x_3,\ x_4,\ x_5,\ x_6,\ x_7,\ x_8]. \end{aligned} \qquad (10)$$

Les bruits du modèle et des mesures, respectivement bm(t) and bs(t), sont supposés blancs, centrés et indépendants. Les équations d'évolution du système s'écrivent alors :

$$\dot{X} = f(X,U) = [\dot{x_1},\ \dot{x_2},\ \dot{x_3},\ \dot{x_4},\ \dot{x_5},\ \dot{x_6},\ \dot{x_7},\ \dot{x_8}]$$

$$\dot{x_1} = \frac{1}{I_z}\begin{bmatrix} L_1[x_4\cos u_1 + x_5\cos u_1 + x_8\sin u_1] - \\ L_2[x_6 + x_7] + \\ \frac{E}{2}[x_4\sin u_1 - x_5\sin u_1] \end{bmatrix},$$

$$\dot{x_2} = \frac{1}{m}\begin{bmatrix} x_8\cos(x_3 - u_1) + x_4\sin(x_3 - u_1) + \\ x_5\sin(x_3 - u_1) + (x_6 + x_7)\sin(x_3) \end{bmatrix},$$

$$\dot{x_3} = \frac{1}{mV_g}\begin{bmatrix} -x_8\sin(x_3 - u_1) + x_4\cos(x_3 - u_1) + \\ x_5\cos(x_3 - u_1) + (x_6 + x_7)\cos x_3 \end{bmatrix} - x_1,$$

$$\dot{x_4} = \frac{x_2}{\sigma_1}(-x_4 + \overline{F_{y11}}(\alpha_{11}, u_2)),$$

$$
\begin{aligned}
\dot{x_5} &= \tfrac{x_2}{\sigma_1}(-x_5 + \overline{F_{y12}}(\alpha_{12}, u_3)),\\
\dot{x_6} &= \tfrac{x_2}{\sigma_2}(-x_6 + \overline{F_{y21}}(\alpha_{21}, u_4)),\\
\dot{x_7} &= \tfrac{x_2}{\sigma_2}(-x_7 + \overline{F_{y22}}(\alpha_{22}, u_5)),\\
\dot{x_8} &= 0.
\end{aligned} \tag{11}
$$

Les équations d'observations sont données par :

$$
\begin{aligned}
y_1 &= x_1,\\
y_2 &= x_2,\\
y_3 &= \tfrac{1}{m}[-x_4 \sin u_1 - x_5 \sin u_1 + x_8 \cos u_1],\\
y_4 &= \tfrac{1}{m}[x_4 \cos u_1 + x_5 \cos u_1 + (x_6 + x_7) + x_6 \sin u_1].
\end{aligned} \tag{12}
$$

Dans la suite, le vecteur d'état X sera estimé en appliquant un filtre de Kalman étendu (voir la section 4.1).

4.1 Méthode d'estimation

L'objectif d'un observateur, ou capteur virtuel, est d'estimer certaines variables inaccessibles du système (capteurs imprécis, inexistant…), et ceci à partir des informations disponibles et d'un modèle représentatif du système. Cette approche d'observation en boucle fermée est schématisée par la figure 3(a). Un exemple simple d'un modèle à boucle ouverte est donné par les relations (1). En raison de la modélisation incomplète, de la variation des paramètres du système et de la présence des bruits inconnus, un modèle en boucle ouverte s'écarterait de valeurs réelles au cours du temps.

Afin de réduire les erreurs d'estimation, il faut que certaines variables estimées soient comparées à leurs mesures réelles. La différence est réinjectée dans l'observateur après multiplication par une matrice de gain K, ainsi le processus d'estimation sera complet (voir figure 3(a)). Dans notre étude, et à cause de la non-linéarité du système véhicule/chaussée, le gain K est calculé selon l'algorithme du filtre de Kalman étendu. L'observateur développé est implanté en mode discret en utilisant l'approche d'Euler du premier ordre.

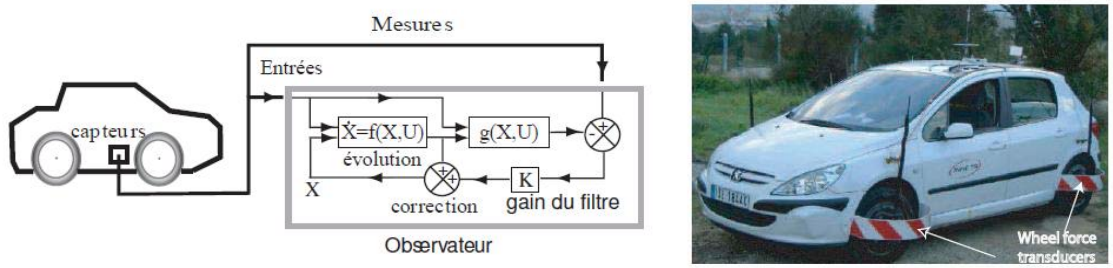


Figure 3 –(a) Processus d'observation; (b) Véhicule du laboratoire INRETS-MA ;

4.2 Analyse d'observabilité

Le système est observable s'il est possible de calculer son état à partir des séquences connues d'entrées et de sorties. Cette propriété est souvent présentée comme la condition de rang de la matrice d'observabilité (critère de Kalman). En utilisant la formulation d'état non linéaire du système, représenté dans la section 3.1, l'observabilité est définie de manière locale et utilise la

dérivée de Lie (Nijmeijer and Van der Schaft 1991). Une analyse d'observabilité du système a été considérée dans Baffet (2007). Il a été démontré que le système est observable, sauf si :

- les angles de braquage sont nuls ;
- véhicule est au repos (V_g=0).

Pour ces situations, nous supposons que les forces latérales et la dérive sont nulles, ce qui correspond approximativement à la réalité.

5. Résultats d'expérimentation

5.1 Véhicule expérimental

Le véhicule représenté sur la figure 3(b) est le véhicule expérimental du laboratoire INRETS-MA (Département Mécanismes d'Accidents). C'est une Peugeot 307 équipée de nombreux capteurs incluant GPS centimétrique, des capteurs de débattements de suspension, des accéléromètres, des gyromètres, des Correvit et des moyeux dynamométriques. Parmi ces capteurs, les capteurs optiques Correvit (prix d'un Correvit : 15 k€) mesurent les angles de dérive et les vitesses longitudinale et latérale du véhicule, alors que les moyeux dynamométriques (prix d'un moyeu : 120 k€) mesurent les forces et les couples des roues. La fréquence d'échantillonnage des capteurs est de 100 Hz.

5.2 Conditions de l'essai expérimental

Plusieurs essais expérimentaux dans différents situations de conduite réalistes, allant des conditions normales jusqu'aux conditions avec des accélérations latérales importantes, ont été effectués pour évaluer la performance de l'observateur présenté dans la section 4. Pour cette étude, nous présentons une chicane où la contribution de la dynamique joue un rôle important. La figure 4(a) présente la trajectoire de la Peugeot (sur une route sèche), sa vitesse, l'angle de braquage et le diagramme des accélérations au cours de l'essai. Ce diagramme montre que des fortes sollicitations latérales ont été obtenues (valeur absolue ≈ 0, 6g), ce qui signifie que le véhicule a roulé dans une situation critique.

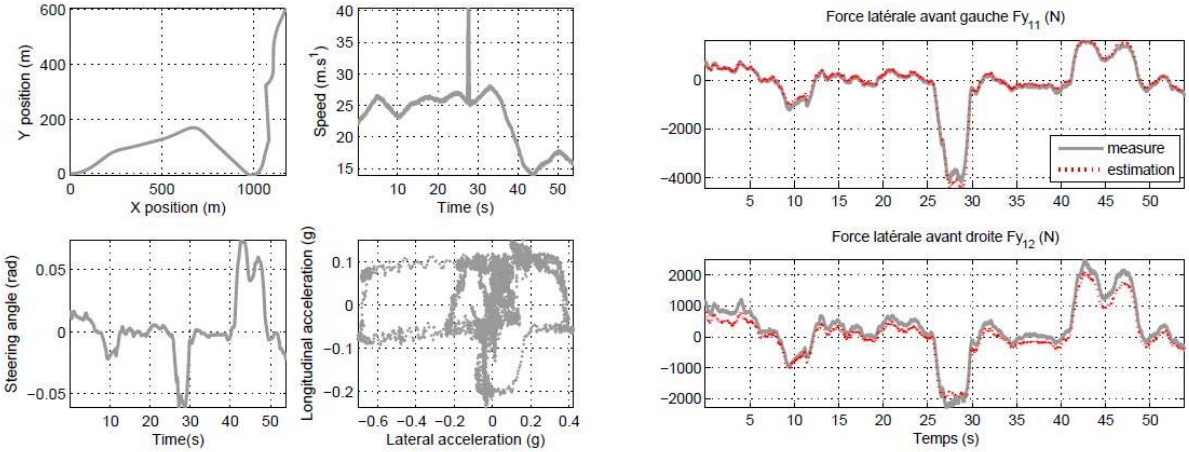


Figure 4 –(a) Essai expérimental : trajectoire du véhicule, sa vitesse, angle de braquage et le diagramme des accélérations de la chicane ; (b) Estimation des forces latérales aux pneus avant.

5.3 Évaluation de l'observateur

Les résultats d'estimation sont présentés sous deux formes : des figures qui comparent les estimations et les mesures, et des tables d'erreurs normalisées. L'erreur normalisée d'une estimation z est définie dans Stephan (2004) selon la relation suivante :

$$\epsilon_z = 100 \times \frac{\|z_{obs} - z_{mes}\|}{max(\|z_{mes}\|)} \qquad (13)$$

où Z_{obs} est la variable estimée par l'observateur, Z_{mes} est la variable mesurée et max($||Z_{mes}||$) est la valeur absolue du maximum de la variable mesurée durant le test. Les figures 4(b) et 5(a) représentent les forces latérales sur les roues avant et arrière, alors que la figure 5(b) montre l'évolution de la dérive au cours de la trajectoire. En comparant les estimations aux mesures, les résultats sont relativement satisfaisants. Des faibles écarts entre estimations et mesures au cours de l'essai sont à noter. Cela pourrait être expliqué par la négligence de certains paramètres géométriques lors de la modélisation, en particulier les angles de carrossage qui produisent également des composantes de forces latérales (Smith 2004). Le tableau 1 donne les valeurs maximales des forces atteintes le long du parcours, la dérive, ainsi que les erreurs normalisées. Malgré la simplicité du modèle choisi, nous déduisons, que pour ce test, la performance de l'observateur est satisfaisante, avec erreur normalisée globalement inférieure à 7%.

Tableau 1 – Valeurs absolues maximales des mesures, moyennes et écarts types des erreurs normalisées

	Max $\|\|\|$	Moyenne %	Ecart type %
F_{y11}	4200 (N)	1.98	2.07
F_{y12}	2500 (N)	7.52	3.62
F_{y21}	3190 (N)	5.07	5.13
F_{y22}	1740 (N)	10.31	7.24
β	0.025 (rad)	8.32	9.41

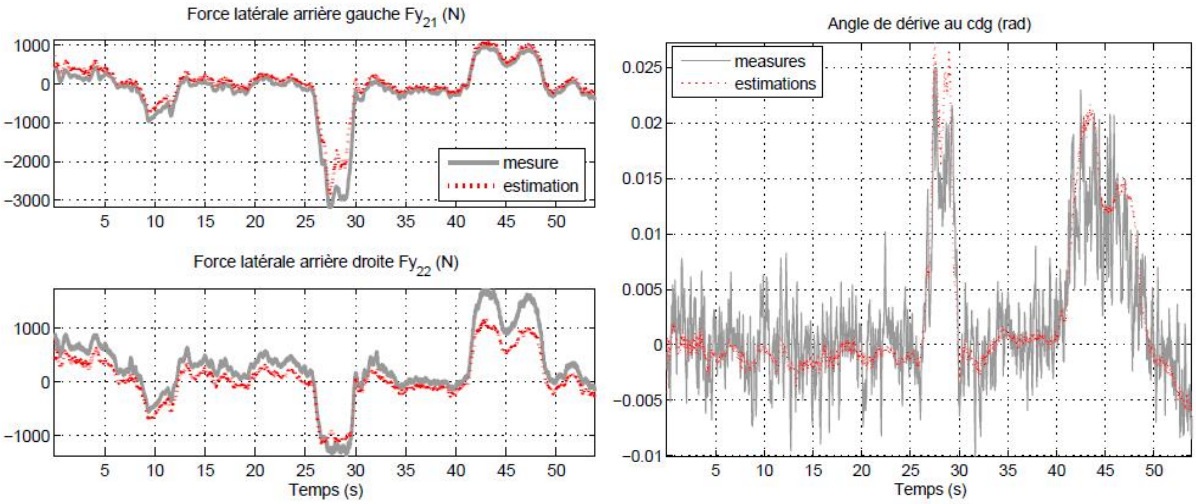


Figure 5 –(a) Estimation des forces latérales aux pneus arrières; (b) Estimation de l'angle de dérive au cdg.

6. Conclusions

Nous avons présenté dans cet article une nouvelle méthode d'estimation des forces latérales et de la dérive, facteurs déterminants pour la stabilité du véhicule. L'observateur est développé à partir d'un modèle simplifié du véhicule de type 4-roues. L'interface du contact pneumatique/ chaussée

est représentée par le modèle Dugoff. Ensuite, une évaluation du coefficient de frottement est effectuée en fonction des estimations des efforts résultantes du processus d'estimation.

La comparaison des estimations à des données expérimentales réelles démontre le potentiel du processus d'estimation, ce qui prouve qu'il est possible de remplacer les Correvit et les moyeux dynamométriques par des capteurs logiciels, qui peuvent fonctionner en temps réel lorsque le véhicule est en mouvement. C'est l'un des résultats importants de ce travail. Une autre contribution majeure concerne l'estimation des forces latérales agissant sur tous les pneus du véhicule. C'est une évolution par rapport à la littérature actuelle concernant la dynamique du véhicule.

Nous envisageons de travailler sur l'amélioration du modèle véhicule/chaussée en vue d'élargir le domaine de validité du processus d'estimation. De plus, il sera d'une importance capitale d'étudier l'effet du couplage de la dynamique longitudinale/latérale sur le comportement latéral des pneus.

Références

- Aparicio, F. et al (2005), "Discussion of a new adaptive speed control system incorporating the geometric characteristics of the road", Int. J. Vehicle Autonomous Systems, vol.3, No.1, pp.47-64.
- Baffet, G. (2007), « Développement et validation expérimentale d'observateurs des forces de contact pneumatique/chaussée d'une automobile », Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, France.
- Baffet, G., Charara, A., Lechner, D. and Thomas, D. (2008), "Experimental evaluation of observers for tire-road forces, sideslip angle and wheel cornering stiffness", Vehicle System Dynamics, vol. 45, pp. 191-216, June.
- Canudas-De-Wit, Tsiotras, C.P., Velenis, E., Basset, M., Gissinger, G. (2003), "Dynamic friction models for road/tire longitudinal interaction»Vehicle System Dynamics", vol. 39, pp. 189-226.
- Doumiati, M., Victorino, A., Charara, A., Lechner, D. and Baffet, G. (2008), "An estimation process for vehicle wheel-ground contact normal forces", IFAC WC'08, Seoul Korea, July.
- Dugoff, J., Fanches, P. and Segel, L. (1970), "An analysis of tire properties and their influence on vehicle dynamic performance", SAE paper (700377).
- Hsu, Y. and Chistian gerdes, J. (2005), "Stabilization of a steer-by-wire vehicle at the limits of handling using feedback linearization", Procedings of IMECE2005, AMSE International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Florida.
- Nijmeijer, H. and Van der Schaft, A.J. (1991), "Nonlinear dynamical control systems", Springer Verlag.
- Ray, L. R. (1997), "Nonlinear tire force estimation and road friction identification : simulation and experiments", Automatica, vol. 33, no. 10, pp. 1819-1833.
- Smith, N. D. (2004), "Undeerstanding parameters influencing tire modeling", Formula SAE Platform, Colorado State University.
- Stéphant, J., Charara, A. and Meizel, D. (2004), "Virtual sensor, application to vehicle sideslip angle and transversal forces", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.51, no.2, April.

ACTUALISATION DES FORMULES FRANÇAISES DE VITESSE V85 PRATIQUEE EN VIRAGE SUR ROUTE A DEUX VOIES

Gérard LOUAH
CETE de l'Ouest / DES
Nantes, France

Guy DUPRE
CETE Normandie - Centre / ERA 34
Rouen, France

Eric VIOLETTE

Résumé

La connaissance des vitesses pratiquées est d'un intérêt majeur en études routières, qu'elles soient de conception, d'exploitation ou de sécurité. En France, des formules exprimant la vitesse ponctuelle pratiquée V_{85} (vitesse non dépassée par 85 % des VL circulant de façon non contrainte) en fonction des caractéristiques géométriques de la route ont été établies par le SETRA en 1986 et sont toujours largement utilisées, directement ou par le biais de guides. Une étude a été entreprise pour les actualiser dans le cas des virages. Les vitesses pratiquées et les caractéristiques géométriques ont été recueillies sur une cinquantaine de virages de configuration variée, et ont fait l'objet d'exploitations statistiques. On présente ici le recueil des données, leur analyse, et les résultats produits. Après analyse détaillée des données relevées, il est proposé de conserver les formules existantes, à un léger ajout près concernant les limitations locales de vitesse.

Cette étude a été commandée, financée et pilotée par le SETRA.

Mots-clés : vitesse pratiquée, virage, route bidirectionnelle à 2 voies

Abstract

The knowledge of operating speeds is of a major interest in highway engineering. In France, formulas expressing V_{85} (the 85th percentile of the speed distribution of free-moving cars) as a function of some geometric characteristics have been established in 1986, and are still widely used, whether directly or through guidelines. A study has been undertaken to update these formulas for horizontal curves. Speed and geometry data have been collected on nearly fifty bends with various characteristics on flat terrain by dry weather. The paper mainly deals with the geometry and speed measurements, the data analysis, and the findings of this study. After a detailed analysis, it is finally proposed to keep the existing formulas, with a minor addendum dealing with local speed limits.

This study has been commissioned, funded and directed by the SETRA.

Keywords: Operating speed, Bend, Two-lane two-direction carriageway.

1. Introduction

La vitesse dite V_{85}, 85ème centile de la distribution de vitesse des VL libres, est utilisée dans de nombreux pays en études routières de conception, d'exploitation ou de sécurité. En France, une étude avait été conduite sur le sujet dans les années 1980 au SETRA. Portant sur plus de 230 virages et rampes, elle avait conduit à des formules exprimant la vitesse V_{85} (mais aussi la vitesse moyenne V_{moy}) en fonction des caractéristiques géométriques principales de la route (Gambard, 1986, Gambard et Louah, 1986).

Pour les routes bidirectionnelles larges de 6 ou 7 m et les routes à 3 voies, et avec R désignant le rayon du virage (en m) et P la rampe (en %), l'expression pour V_{85} (en km/h) était :

$$V_{85} = min \{ [102 / (1 + 346 / R^{1.5})], [102 - 0.31 P^2] \} \quad (1)$$

Pour les routes à 2 voies de 5 m et les routes à 2x2 voies, la valeur du coefficient 102 était à remplacer respectivement par 92 et 120 km/h.

Ces formules, notées ici SETRA-86, sont largement utilisées, notamment par le biais des nombreux documents qui s'y réfèrent, directement ou implicitement : SRR (Sécurité des Routes et des Rues), ARP (Aménagement des Routes Principales), ICTAAL (Instruction sur les Conditions Techniques d'Aménagement des Autoroutes de Liaison), ACI/P (Aménagement des Carrefours Interurbains - Carrefours Plans), Signalisation des virages… Elles sont également intégrées dans les programmes DIAVI pour l'aide à la conception et ALERTINFRA pour les diagnostics de sécurité. Elles permettent ainsi de déterminer des distances de visibilité à offrir à l'usager, d'aider à décider du niveau de signalisation à implanter dans un virage, d'alerter les gestionnaires sur les virages accidentogènes…

Du fait de leur importance, le SETRA décida en 2002 de les actualiser, diverses indications laissant supposer que les vitesses pratiquées avaient largement évolué (Fluteaux, 2001), au vu de mesures partielles, avait ainsi choisi de remplacer la valeur 102 par 114.6 km/h en entrée de son programme de simulation. Dans un premier temps, il fut décidé de mettre l'accent sur la vitesse V_{85} en virage sur route à 2 voies de 7 m, en laissant de côté les vitesses moyennes V_{moy} non utilisées dans les applications, et en différant l'actualisation des vitesses en rampe. Un groupe de travail fut alors constitué, piloté par le SETRA et associant quatre CETE.

Le travail présenté ici a été esquissé dans (Louah *et al.*, 2009) et (Louah et Menacer, 2008).

2. Les sites

2.1 Plan d'expérience

Même si les variables a priori pertinentes sont assez bien identifiées (rayon et longueur du virage, dévers, longueur de l'alignement droit précédent…), il n'est pas possible pour une telle étude de remplir un plan d'expérience rigoureux, car certaines configurations ne peuvent, par nature, être rencontrées, comme un virage très serré au bout d'une longue ligne droite. Après un inventaire réalisé par les CETE Normandie - Centre, du Sud-Ouest et de l'Est à partir des bases de données routières et une validation sur le terrain des sites présélectionnés, et afin de respecter le budget imparti, 49 sites sur routes nationales (avant leur transfert aux départements) et départementales. Du fait de problèmes techniques ou d'anomalies dans les données, seules les données de 41 d'entre eux ont contribué à l'exploitation finale.

2.2 Données géométriques

Tous les sites ont fait l'objet de mesures avec le véhicule équipé PALAS (LR d'Autun), qui outre des caractéristiques de chaussée, relève avec un pas de 10 m le rayon R_i et le dévers d_i (i indice d'abscisse). Les rayons de plus de 2000 m sont tronqués à cette valeur, qui caractérise ainsi, au sens accordé par ce matériel, les alignements droits. Pour affecter une valeur R de rayon à un virage, diverses définitions ont été testées (minimum des R_i, moyenne du minimum des R_i et de R_{i-1} et R_{i+1}, moyenne des trois plus faibles R_i), pour retenir la plus simple (minimum des R_i), au demeurant très proche des deux autres.

Avec de telles données, il est par ailleurs possible de calculer le taux de changement de courbure de l'ensemble du virage, noté ici CCR_V pour *Curvature Change Rate*. Il s'exprime comme la moyenne, pondérée par les longueurs, des inverses des rayons ponctuels, soit ici :

$$CCR_V = [\Sigma (L_i / R_i) / 63\ 700] / \Sigma (L_i) \qquad (2)$$

où R_i et L_i se réfèrent aux segments élémentaires de 10 m, et où la constante 63 700 dérive de $200 / \pi$ (puisqu'il est usuel de le mesurer en grades par kilomètre).

En simplifiant la même définition, on peut aussi calculer un taux de changement de courbure ponctuel à partir du rayon R du virage :

$$CCR_P = 63\ 700 / R \qquad (3)$$

Pour l'ensemble des sites, CCR_V vaut de l'ordre de 60 % de CCR_P. Mais comme la relation entre les deux est quasi-linéaire, le choix de l'un ou de l'autre est indifférent, dès lors qu'il est clairement énoncé. Cela implique par contre que dans les formules de vitesse faisant intervenir un CCR, il doit être indiqué duquel il s'agit. Ainsi, la formule SETRA-86 a été souvent reprise, notamment à la suite de Lamm *et al.* (1999), en y remplaçant le rayon R par 63 700 / CCR, sans qu'en soit mentionné le côté ponctuel, ce qui rend hasardeuse toute comparaison avec d'autres formules où le CCR a pu être défini pour l'ensemble du virage.

A partir de la définition (2), on peut calculer la variation de courbure en amont du virage. On a ainsi calculé des valeurs CCR_{250}, CCR_{500} et CCR_{1000} pour caractériser respectivement la sinuosité des 250, 500 et 1000 m précédant l'amorce du virage.

Comme pour le rayon, plusieurs définitions du dévers d ont été testées, donnant aussi des résultats proches, pour retenir finalement le dévers d_i au point de rayon minimal R_i.

L'étendue des variables de géométrie était la suivante : largeur de 6.2 à 7.6 m (hormis trois virages sur route à 3 voies d'environ 10 m, mais avec une seule voie dans le sens mesuré), rayon de 55 à 388 m (soit CCR_P de 154 à 1158 gr/km), CCR_V de 130 à 656 gr/km, dévers de 0.7 à 11.6 % (correctement orienté), longueur de virage de 70 à 440 m, longueur d'alignement droit précédent de 10 à plus de 1000 m (valeur tronquée), déclivité de -3.3 à 3.3 %.

3. Données de trafic

3.1 Mesures de trafic

Les mesures ont été réalisées au milieu et à environ 250 m en amont de chaque virage, au moyen de capteurs pneumatiques indépendants fournissant l'instant de passage (au 1/100 s), la vitesse (au km/h) et la catégorie du véhicule. Elles ont été effectuées pendant au moins un jour de semaine, par temps sec, délivrant plusieurs milliers d'enregistrements par site.

3.2 Véhicules libres

La plupart des méthodes d'estimation de V_{85} supposent une sélection des VL libres. Celle-ci repose sur l'hypothèse qu'un véhicule (ou plutôt un couple véhicule - conducteur) se trouve dans l'un de deux états, libre ou contraint, le véhicule libre étant celui qui n'interfère pas avec son prédécesseur et peut ainsi choisir sa vitesse sans devoir en tenir compte (Olivero et Jacob, 2006). Divers critères d'appartenance à l'une des deux catégories ont été proposés, construits à partir des intervalles et des vitesses relatives. Il a été retenu le plus simple, à savoir un seuil d'intervalle temporel servant de frontière. Un test de X^2 sur l'adéquation à la loi exponentielle de la distribution des intervalles des véhicules libres a conduit à retenir un seuil de 4 s. Un contrôle complémentaire a permis de montrer que la valeur de V_{85} n'était pas sensible au seuil au-delà de cette valeur.

3.3 Tendance générale de la vitesse

Du fait de l'indisponibilité temporaire des matériels ou des équipes de recueil, les données de vitesse ont été relevées sur une période s'étendant de mars 2003 à octobre 2005. Celle-ci coïncide avec le déploiement massif des radars de contrôle - sanction automatisé, qui a eu un effet majeur sur les vitesses pratiquées sur l'ensemble du réseau. La figure 1 (ONISR, 2008) indique l'évolution dans le temps de la vitesse moyenne pratiquée par les VL, de jour et hors intempéries, par catégorie de route. Les deux courbes les plus basses (routes départementales et routes nationales) sont celles qui nous intéressent ici.

4. Traitement des données

L'établissement d'une formule exprimant V_{85} en fonction de la géométrie a suivi plusieurs étapes : prise en compte de la décroissance générale de la vitesse, détermination d'une valeur asymptotique, identification des variables explicatives significatives, test de relations diverses, ajustement final.

4.1 Prise en compte de la décroissance générale de la vitesse

Pour prendre en compte la décroissance générale de la vitesse, des corrections ont dû être introduites. Deux voies ont été suivies pour cela, qui ont conduit à des résultats similaires.

La première a consisté à corriger les données de vitesse selon leur date de recueil. Les données de base des sondages de l'ONISR ont été retraitées pour calculer l'évolution du 85ème centile, et il a ainsi été calculé, prenant la dernière année de mesures (2005) comme base, des coefficients correcteurs annuels ou quadrimestriels pour la période concernée, qui ont été appliqués aux données en absence d'information plus locale.

La seconde voie a été de considérer les données brutes, mais d'introduire l'écart Y entre 2005 et l'année de mesure comme variable explicative de V_{85} dans les régressions.

4.2 Questions relatives à la vitesse en approche

En plus des caractéristiques géométriques, il aurait pu être choisi de retenir V_{85A}, la vitesse d'approche en amont, comme variable explicative de V_{85}. Cette option n'a pas été retenue pour deux raisons. Tout d'abord, V_{85A} ne peut de toute évidence être considérée comme représentative d'une vitesse en ligne droite pour certains sites (elle est même quelquefois inférieure à la vitesse dans le virage). Mais surtout, pour certaines applications de V_{85}, il aurait été nécessaire de disposer d'une estimation de V_{85A}, ce qui aurait été un problème.

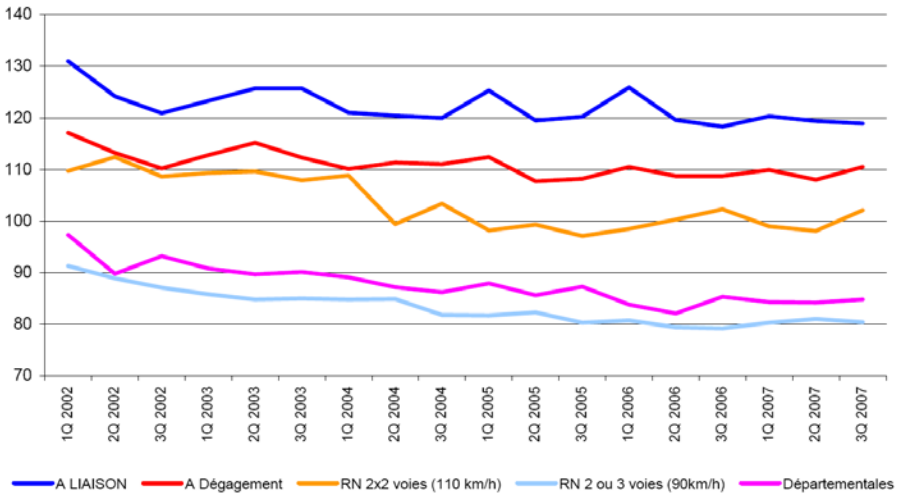


Figure 1 - Evolution de la vitesse moyenne des VL sur le réseau français *(source ONISR)*

4.3 Valeur asymptotique de la vitesse

On ne considère pas V_{85A}, donc il faut traiter la valeur asymptotique de V_{85} quand $R \rightarrow \infty$ (ou $CCR_P \rightarrow 0$), valeur correspondant à celle de 102 km/h dans le modèle SETRA-86.

Le plus naturel est de la déterminer à partir de la modélisation de V_{85} en fonction de R (ou de CCR_P) sans contrainte. Cette solution est très sensible au modèle lui-même, d'autant plus que les observations ne couvrent pas ces valeurs, ce qui peut entraîner des erreurs. Sans être un problème majeur dans le cas d'un virage isolé, cela le devient pour une section de route. Une seconde possibilité est d'utiliser, afin d'en déduire une valeur moyenne, les valeurs de vitesse en amont pour les sites précédés d'une ligne droite raisonnablement longue. Une troisième voie est l'utilisation d'autres sources, par exemple le 85ème centile calculé à partir des données de base de l'ONISR, corrigé pour le rendre plus représentatif de notre définition de la vitesse V_{85} (relatif à des véhicules circulant en conditions de faible trafic, ce 85ème centile est quelque peu différent de la vitesse V_{85}, qui est obtenue à partir de véhicules libres). De nos mesures, il ressort que de 3 km/h est l'ordre de grandeur de la valeur à rajouter au 85ème centile pour cela.

Aucune de ces démarches n'étant exempte de défauts, nous avons donc comparé la valeur à l'origine d'un modèle linéaire exprimant V_{85} en fonction de CCR_P (lequel est moins sensible pour cela que des formes non-linéaires impliquant R), la vitesse d'approche sur les plus longues lignes droites (plus de 500 m), et le 85ème centile des vitesses pratiquées sur routes à 2 voies dans le sondage de l'ONISR, augmenté donc de 3 km/h. Comparant ainsi respectivement 102.1, 102.8 et 100.5 km/h, cette approche empirique nous a conduit à retenir 102 km/h comme valeur asymptotique imposée, comme dans la formule SETRA-86.

4.4 Variables explicatives potentielles

Diverses formules ont été testées par régression pour expliquer V_{85} par les variables potentiellement concernées. Pour la géométrie, ce sont le rayon (ou l'un des deux CCR), la longueur du virage, celle de l'alignement droit précédent, le CCR de l'approche, le dévers, la largeur, la rampe, l'indicateur booléen droite *vs* gauche, et pour la signalisation, l'indicateur booléen δ_{70} pour une limitation locale de vitesse (70 km/h dans le cas de 8 virages). Tous les sites étant en milieu purement interurbain et ne présentant aucune caractéristique particulière marquée, il n'a pas été introduit de variable relative à l'environnement général. Le statut administratif (RN *vs* RD) a aussi été testé, car susceptible d'avoir une incidence du fait d'un niveau possiblement

différent de contrôle. Les caractéristiques de surface n'ont pas été considérées, l'étude portant sur le seul effet de la géométrie. Les relations établies au final sont donc à considérer comme valides pour des chaussées à surface en état normal d'entretien.

4.5 Significativité des variables explicatives

La correction préalable des vitesses selon la date de leur relevé, ou l'introduction de l'écart Y entre date de recueil et 2005 comme variable explicative se sont révélées analogues en matière de qualité des résultats. Le fait que l'écart Y soit très significatif dans ces conditions confirme la nécessité de considérer la date de réalisation des mesures.

Comme variable de courbure, il aurait été indifférent dans le principe de choisir le rayon R ou l'un des deux CCR, mais la variable CCR_V étant plus délicate à obtenir que les deux autres, il aurait été peu souhaitable de la faire intervenir dans une formule. Le choix de retenir le rayon R plutôt que CCR_P ne découle pas de la qualité des résultats obtenus, identique, mais de la non-utilisation en France du CCR. Le rayon s'avère de très loin la plus significative des variables explicatives de la vitesse V_{85}.

La significativité des diverses variables explicatives secondaires a été testée en utilisant CCR_P, qui se prête au modèle linéaire (ce qui n'est pas le cas du rayon R) et permet ainsi plus aisément le test de nombreuses alternatives. Cette étape a montré qu'aucune autre variable géométrique n'avait d'incidence significative sur la vitesse. Pour le dévers, ce constat peut provenir de sa forte corrélation avec le rayon, susceptible de cacher son effet propre. Pour d'autres variables (largeur, rampe), la faible marge de leur variation peut en être la raison.

En dehors des variables de géométrie, seul l'indicateur booléen δ_{70} pour une limitation locale de vitesse à 70 km/h s'est révélé significatif. Quoique cohérent avec les données nationales (vitesse un peu plus élevée sur RD que sur RN) et apportant une légère amélioration à la qualité des régressions, le statut administratif n'a pas été retenu car en limite de significativité.

4.6 Formes non-linéaires testées pour V_{85}

En fonction du rayon R, le nuage de points visible sur les figures 2 et 3 exhibe une forme rappelant, au moins pour les rayons les plus contraignants, la classique expression en $R^{1/2}$ de la vitesse admissible déduite de l'équation du mouvement (Kanellaidis et Dimitropoulos, 1995). Pour les besoins de la représentation graphique, les observations y apparaissent corrigées de l'effet de leur date de recueil et de celui de l'éventuelle limitation de vitesse (soit 7 km/h en moyenne pour ce dernier).

L'étape suivante a alors consisté à tester diverses expressions non-linéaires de V_{85} en fonction du rayon R. Une douzaine de courbes possédant une asymptote ont été ajustées, issues pour partie d'une revue de la littérature (Louah, 2002). Les figures 2 et 3 en rapportent huit (pour l'analyse, les expressions figurant en légende ont été amendées afin de prendre en compte l'effet de la date de recueil et celui de l'éventuelle limitation de vitesse, comme illustré en 4.7 pour le cas de la courbe de type SETRA-86).

Les courbes de la figure 2 ont été ajustées avec tous leurs paramètres libres. Elles sont proches les unes des autres, du moins dans la région d'observation des données, ce qui explique des valeurs de R^2 assez voisines (de 0.818 pour la 4ème dans l'ordre de présentation sur le graphique à 0.845 pour la 7ème). La figure 3 présente les courbes correspondantes, où la valeur 102 km/h a été imposée comme asymptote. La gamme des R^2 s'élargit (de 0.698 pour la 5ème à 0.841 pour la 7ème) et certaines formulations deviennent alors non pertinentes.

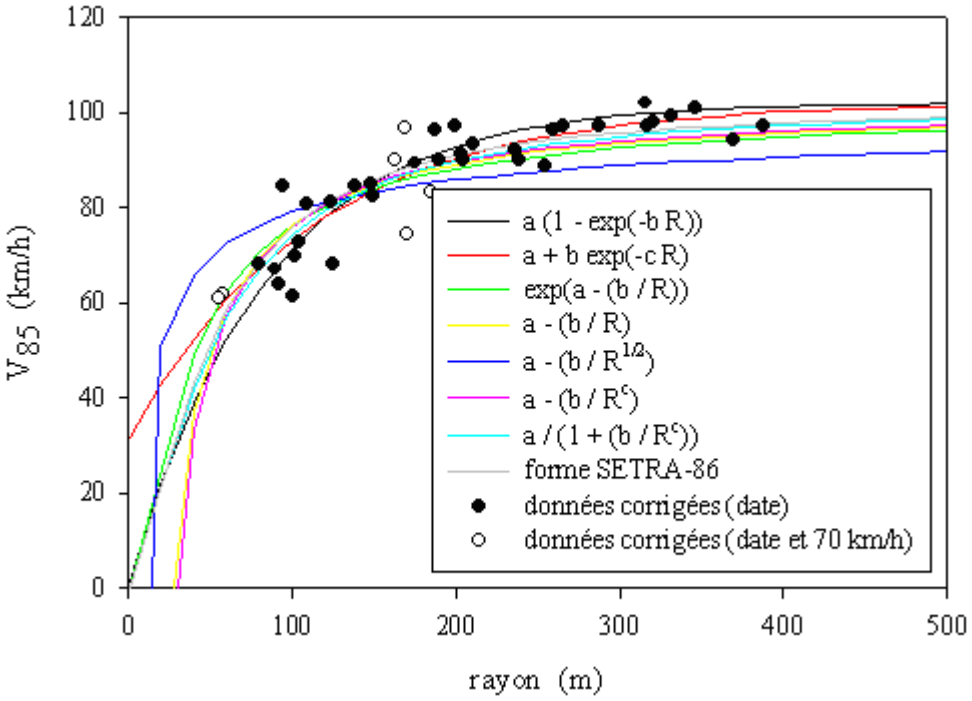


Figure 2 - 8 courbes exprimant V_{85} en fonction du rayon

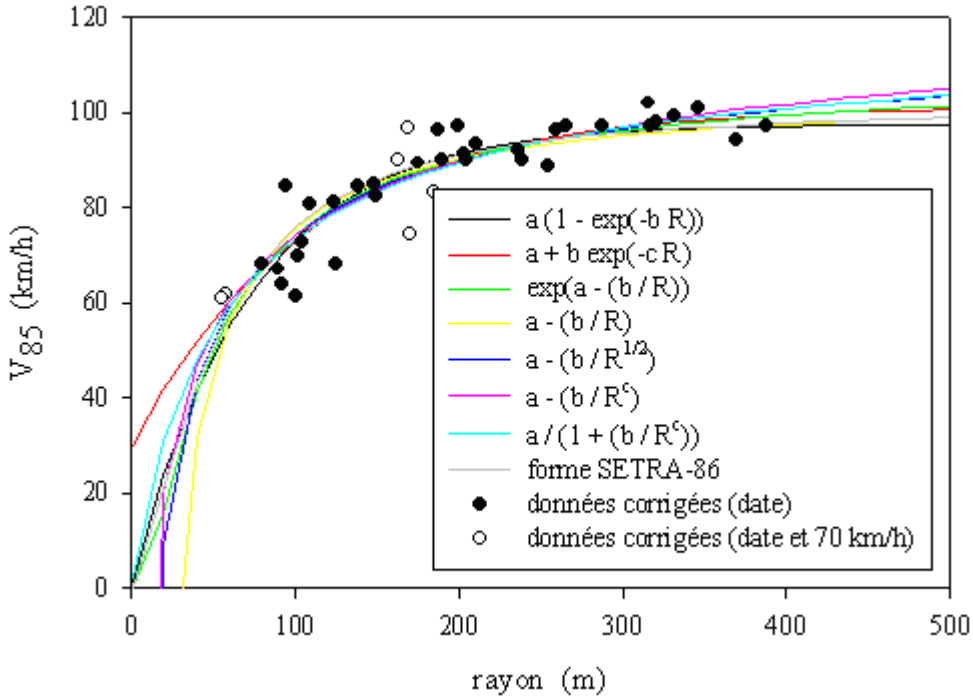


Figure 3 - 8 courbes exprimant V_{85} en fonction du rayon avec asymptote imposée

4.7 Résultats avec une formule de type SETRA-86

Pour tenir compte dans les formules de type SETRA-86 de l'effet de la date de recueil et de celui de l'éventuelle limitation de vitesse, il a semblé plus pertinent d'introduire ces variables au numérateur plutôt que comme termes additifs, car elles ont probablement un effet dépendant du

rayon (cette hypothèse a été confirmée par une meilleure valeur de R^2 lorsque les deux alternatives ont été comparées). La formule testée devient alors :

$$V_{85} = [(a - d\,\delta_{70} + e\,Y) / (1 + b / R^C)] \quad (4)$$

Avec l'ensemble des paramètres libres, R^2 vaut 0.846, et avec le paramètre *a* fixé à 102 km/h, R^2 vaut 0.840, soit des valeurs extrêmement proches des plus élevées indiquées en 4.6. Aussi, aucune des autres courbes candidates ne donnant de résultats nettement meilleurs (notamment dans le cas d'asymptote imposée), il a été décidé de retenir une courbe de type SETRA-86.

Mais avec cette dernière, R^2 vaut encore 0.831 quand les paramètres *b* et *c* sont eux aussi fixés à leurs valeurs originales 346 et 1.5. La perte de qualité de la régression étant relativement minime, et les trois courbes ainsi obtenues étant visuellement très proches, il n'a pas été jugé nécessaire de fixer de nouvelles valeurs à un jeu de paramètres largement diffusé et utilisé.

Une fois éliminé l'effet de la date de recueil, la formule SETRA-86 est donc ainsi modifiée :

$$V_{85} = [(102 - 9\,\delta_{70}) / (1 + 346 / R^{1.5})] \quad (5)$$

La courbe pleine de la figure 4 est la référence, et la courbe pointillée est celle à utiliser en cas de limitation à 70 km/h.

La valeur de 9 km/h au numérateur conduit à des réductions de 5 à 8 km/h dans la gamme de rayons où une limitation était implémentée au sein de notre échantillon. Mais il serait nécessaire de conduire une étude spécifique sur le sujet pour une meilleure précision : en effet, les deux sites de rayon nettement inférieur aux autres (55 et 58 m) faisaient l'objet d'une telle limitation, aussi n'est-il pas aisé de distinguer les deux effets.

Comme les données de l'ONISR (figure 1) montrent que les vitesses pratiquées au niveau national sont maintenant relativement stabilisées, on pourra considérer valides aujourd'hui les formules établies.

5. Points annexes

5.1 Réductions individuelle et globale de vitesse

Lors d'une étude préliminaire (Louah, 2002) portant sur trois virages observés dans chaque sens, soit six sites, un échantillon des données a fait l'objet d'un appariement manuel visant à affecter à chaque véhicule ses deux vitesses en approche et en virage, permettant donc la connaissance des réductions individuelles de vitesse ΔV. Un résultat intéressant, qui confirme les constats d'autres auteurs comme par exemple McFadden et Elefteriadou (2000), est que le 85ème centile de la distribution des réductions individuelles de vitesse $(\Delta V)_{85}$ est bien plus élevé que la différence $\Delta(V_{85}) = V_{85A} - V_{85}$ des 85èmes centiles des distributions de vitesse. Pour les six sites, $(\Delta V)_{85}$ est environ 40 % (20 à 70 %) plus élevé que $\Delta(V_{85})$. En fait, la réduction $\Delta(V_{85})$ est appliquée par environ 30 % (25 à 40 %) des usagers et non pas par 15 % comme on le pense quelquefois. Ceci n'est pas sans conséquence sur l'usage qui est fait de la variable $\Delta(V_{85})$, par exemple pour l'analyse de la cohérence d'un itinéraire comme suggéré par Lamm *et al.* (1999), car il est important de ne pas faire à ce sujet de mauvaise interprétation.

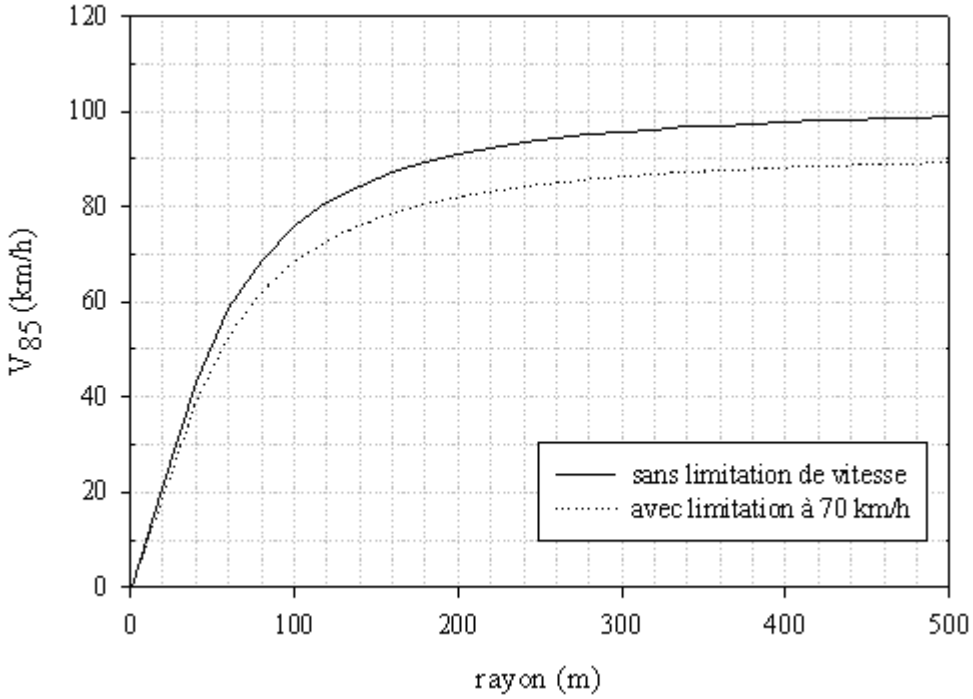


Figure 4 - Vitesse V_{85} en virage sur route de 6 ou 7 m

5.2 Véhicules lourds

La vitesse de véhicules lourds n'a pas été étudiée ici. Par contre, une recherche distincte de Conche et Dupré (2006) à partir d'une partie (15 virages) des mêmes données, a conduit à retenir une expression de la forme SETRA-86, avec pour seule différence des valeurs asymptotiques valant de 92 à 98 km/h pour les trois catégories de poids lourds considérées. La valeur la plus élevée est donc très proche de celle établie ici pour les véhicules légers, mais la méthodologie d'analyse n'étant pas identique, on se gardera de toute conclusion hâtive.

6. Discussion

L'étude ici relatée nous a conduit à conserver la formule SETRA-86 exprimant la vitesse V_{85} en virage en fonction du rayon, avec un simple additif pour la présence d'une limitation locale de vitesse à 70 km/h, car il n'y avait pas d'éléments contraires pour la modifier. Cette formule est valide pour les routes d'une largeur de 6 à 7 m. Aucune mesure n'ayant été réalisée sur des routes d'une autre catégorie (5 m, 3 voies, 2x2 voies), il est proposé par défaut de conserver également pour celles-ci les formules anciennes, c'est à dire avec des valeurs respectives au numérateur de 92, 102 et 120 km/h, avec le même additif en cas de limitation de vitesse pour les routes de 5 m et à 3 voies (la question est pendante d'une limitation locale de vitesse sur route à 2x2 voies, car nos observations ne sont pas pertinentes pour celles-ci).

Le fait de ne pas remettre en cause des formules de vitesse établies en 1986 ne signifie pas que les comportements en la matière n'ont pas évolué depuis lors. Une remarque annexe est que les vitesses et les caractéristiques géométriques, notamment les rayons, n'ont pas été mesurées cette fois de la même façon qu'en 1986, ce qui peut biaiser la comparaison. Ces formules n'étaient fort probablement plus valides en 2002 lorsqu'il a été décidé de les actualiser, mais le déploiement du contrôle - sanction automatisé a depuis fait nettement baisser les vitesses pratiquées. Les comportements ont sans doute changé, et les caractéristiques des véhicules ainsi que dans une moindre mesure celles des routes ont été améliorées. Mais ces changements sont plus

susceptibles d'apparaître sur des profils de vitesse, notamment en rampe, que dans les virages qui ont fait l'objet de cette étude.

De nombreux aspects mériteraient par ailleurs d'être traités, en plus de ceux déjà évoqués : comparer les rayons des trajectoires à ceux des virages, étudier l'effet d'alertes dynamiques… Il resterait aussi à comparer, dans le but de déterminer des marges de sécurité, les vitesses pratiquées aux vitesses admissibles obtenues à partir de modèles impliquant caractéristiques de surface et d'adhérence. Sur ces points et d'autres, divers travaux ont été ou sont encore menés par ailleurs, notamment dans le cadre du programme de recherche SARI, dont il serait intéressant de confronter les résultats à ceux présentés ici.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier les personnes qui par leurs travaux, renseignements ou conseils ont contribué à cette étude : Serge Boyer, Max Choupas, Pierre De Gonneville, Lucien Di Giacomo, David Doucet, Sylvain Giausserand, Jack Khobzi, Bernard Lacroux, Patrick Le Breton, Maud Lefeuvre, Mathieu Le Pen, Christophe Luc, Olivier Moisan, Olivier Menacer, Lionel Patte, et ceux qu'ils ont malencontreusement oubliés.

Références

- Conche, F. et Dupré, G. (2006), « Programme de recherche TRUCKS - Vitesse des poids lourds en virage », rapport d'étude, CETE Normandie - Centre, Rouen.
- Fluteaux, L. (2001), « Contribution à l'évaluation des conditions de circulation sur les routes bidirectionnelles en rase campagne », thèse de Doctorat en Mathématiques appliquées, Université de Marne-la-Vallée.
- Gambard, J.M. (1986), « Vitesses pratiquées et géométrie de la route », note d'information n°10, SETRA, Bagneux.
- Gambard, J.M. et Louah, G. (1986), « Vitesses pratiquées et géométrie de la route », rapport d'étude, SETRA, Bagneux.
- Kanellaidis, G. and Dimitropoulos, I. (1995), "Investigation of current and proposed superelevation practices on roadway curves", Proc. 1st International TRB Symposium on Highway Geometric Design, Boston.
- Lamm, R., Psarianos, B., Mailaender, T. and Choueiri, E. (1999), "Highway design and traffic safety engineering handbook", McGraw-Hill, New York.
- Louah, G. (2002), « Vitesse ponctuelle des véhicules légers en fonction des caractéristiques de la route - 1) Bibliographie commentée - 2) Tests préliminaires sur 3 virages », rapport d'étude, CETE de l'Ouest, Nantes.
- Louah, G. et Menacer, O. (2008), « La vitesse pratiquée, ou V85 - Formules de calcul », note d'information n°127, SETRA, Bagneux.
- Louah, G., Menacer, O., Dupré, G. and Violette, E. (2009), "Updating French formulas for operating speeds on horizontal curves of rural two-lane highways", Advances in Transportation Studies, 18, 85-96.
- McFadden, J. and Elefteriadou, L. (2000), "Evaluating horizontal alignment design consistency of two-lane rural highways: Development of a new procedure", Transportation Research Record, 1737, 9-17.
- Olivero, P. et Jacob, B. (2006), « Glossaire de la métrologie du trafic et des trajectoires - version 5.4 », LCPC, Paris.
- ONISR (2008), « Observatoire des vitesses », publication quadrimestrielle, ONISR, Paris.

EVALUATION DU RISQUE DE SORTIE DE ROUTE POUR L'AIDE A LA CONDUITE OU LE DIAGNOSTIC D'INFRASTRUCTURE

Johann BRUNET **Pierre DA SILVA DIAS** **Gérard YAHIAOUI**
Nexyad
St Germain en Laye, France

Résumé
Ce papier décrit la conception et l'utilisation d'un module d'évaluation du risque de sortie de route. Ce module s'appuie sur le codage de l'expertise de professionnels du domaine routier. Nous présentons en premier lieu la chaîne de causalité obtenue par la synthèse des interviews de plusieurs experts du domaine routier (laboratoires, industriels, en simulation et en contexte réel). Après avoir présenté le formalisme de la théorie des possibilités, nous décrivons les choix d'implantation pris. Enfin, nous illustrons notre système évolutif par des résultats sur simulateur et sur données réelles.

Mots-clés: Risque routier, sortie de route, théorie des possibilités, logique floue, aide à la conduite, diagnostique routier, module embarqué, expérimentation, simulation, mesure en temps réel.

Abstract
This paper shows the conception and the use of a library who allows to estimate the risk to go out of road. This library is based on the knowledge of road experts. At First, we show the causality chain produce with the synthesis of interviews of many road experts (laboratory, industrialist, in simulation or in real). After describe the vocabulary and symbols of the possibility theory, we show the programming choices. In addition, we spot the relevance of this method with results on virtual and real data.

Keywords: Road risk, road departure, possibility theory, fuzzy logic, driving assistance, road diagnostic, on board library, experimentation, simulation, real time measure.

1. Introduction

Le code de la route impose que le conducteur maîtrise la trajectoire de son véhicule en toutes circonstances. Or, il n'existe pas d'outil d'aide à la conduite alertant le conducteur sur une éventuelle difficulté à venir. C'est dans cette optique que Nexyad a mis au point un module embarqué d'évaluation prédictive du risque de sortie de route. Ce travail a été réalisé dans le cadre des thèmes IRCAD, RADARR et VIZIR du projet SARI (programme de recherche PREDIT).

La complexité d'un tel module provient en particulier des éléments suivants :

- Yahiaoui, Dupre, Lechner, Naude, Schaefer (2006) expliquent que les facteurs de risque sont potentiellement très nombreux et hétérogènes.
- La modélisation détaillée du système {conducteur, véhicule, infrastructure} est incompatible avec les contraintes de temps réel d'un système embarqué.
- Enfin, les événements conduisant à un accident sont par nature rares, ce qui rend difficile leur analyse statistique et par conséquent l'identification d'une probabilité comme exposé par Amat et Yahiaoui (2002) et Beauzamy (2004).

La difficulté d'identifier des probabilités est contre balancée par l'existence d'une expertise humaine sur le risque de sortie de route. Pour utiliser cette expertise, nous avons choisi d'utiliser la théorie des possibilités décrite par Dubois et Prade (2001) :

- Celle-ci permet de formaliser des connaissances graduelles et imprécises.
- Elle permet de prendre en compte de façon naturelle l'incertitude sur les données d'entrées, voire de fonctionner en cas de données manquantes.
- Les entrées peuvent être de niveau d'abstraction et de support numérique très différents (mesures, connaissances a priori, etc.).
- La prise en compte d'un éventuel nouveau facteur de risque ne remet pas en cause la structure logique du système.

2. Approches étudiées dans la bibliographie

Nous avons trouvé des travaux qui, pour identifier des probabilités sur des accidents, par nature événements rares, agrégent les données sur de grandes périodes, zones géographiques, et types d'accidents, par exemple l'approche de « Sécurité routière et analyse multi scalaire du territoire » Fleury, Peytavin, Brenac, Saint-Gérand, Blondel, Medjkane, Millot, Sauvaget, Delpierre, (2008) qui est basée sur une analyse territoriale avec des systèmes d'information géographique.

D'autres travaux s'intéressent uniquement à certains facteurs de risque : Le logiciel Alertinfra du CETE de Lyon (2005) s'intéresse principalement à l'influence de la géométrie et des caractéristiques de surface ; La lisibilité est le facteur prépondérant de l'« Evaluation du risque routier par l'analyse de la lisibilité de la route » de De Neuville, Bommel-Orsini (2009) ; C'est la dynamique du véhicule qui permet de calculer la limite physique de la vitesse de passage d'un virage avec le logiciel DIARI de Lechner, Thomas, Baque et Barletta (2008) ; Les facteurs climatiques (vent, pluie) sont au cœur de plusieurs autres approches proposées par Do (2009) dans le rapport final du projet IRCAD.

Nous proposons une approche nouvelle qui intègre un grand nombre de facteurs de risque et qui se focalisent sur la sortie de route.

3. Elaboration de la méthode d'évaluation du risque de sortie de route

3.1 Formulation de l'expertise

La synthèse du recueil d'expertise détaillé dans Yahiaoui, Dupre, Lechner, Naude, Schaefer (2006), qui reprend aussi Bootsma (2003), Ferrandez et Yerpez (1986), INRETS (2005), Lefeuvre (2004), Page (2004), Predit (2002), Schaefer (2003), SETRA (1998), Viola (2003), a permis de faire ressortir des atomes de connaissance sur la base desquels nous avons construit notre système :

- Mauvaise signalisation de l'infrastructure, cet atome est lui-même la résultante de nombreux facteurs : Usure (ou inexistence) des marquages au sol, modifications récentes non signalées, etc.
- Mauvaise géométrie du tracé : Rupture dans la régularité d'un enchaînement de virages, rupture du rayon de courbure dans un virage, etc.
- Perturbations climatiques : Cela peut-être tout ce qui est en suspension dans l'air et qui gêne la visibilité comme l'eau, la neige, etc. ou qui déposé sur le sol perturbe le contact pneu chaussée.
- Défauts d'uni ou de texture : Les défauts d'uni génèrent des sollicitations sur le véhicule qui perturbent sa dynamique et surprennent le conducteur. Le défaut de texture, influence l'adhérence.

La chaîne de causalité que nous avons pu définir (Figure 1) montre la complexité du risque routier. Elle permet aussi de disposer d'une structure globale pour implanter et simuler une fonction de risque complète ou partielle (liée à certains facteurs dont nous voudrions étudier spécifiquement les effets, ex : l'adhérence pour le thème IRCAD ou la visibilité pour le thème VIZIR du projet SARI).

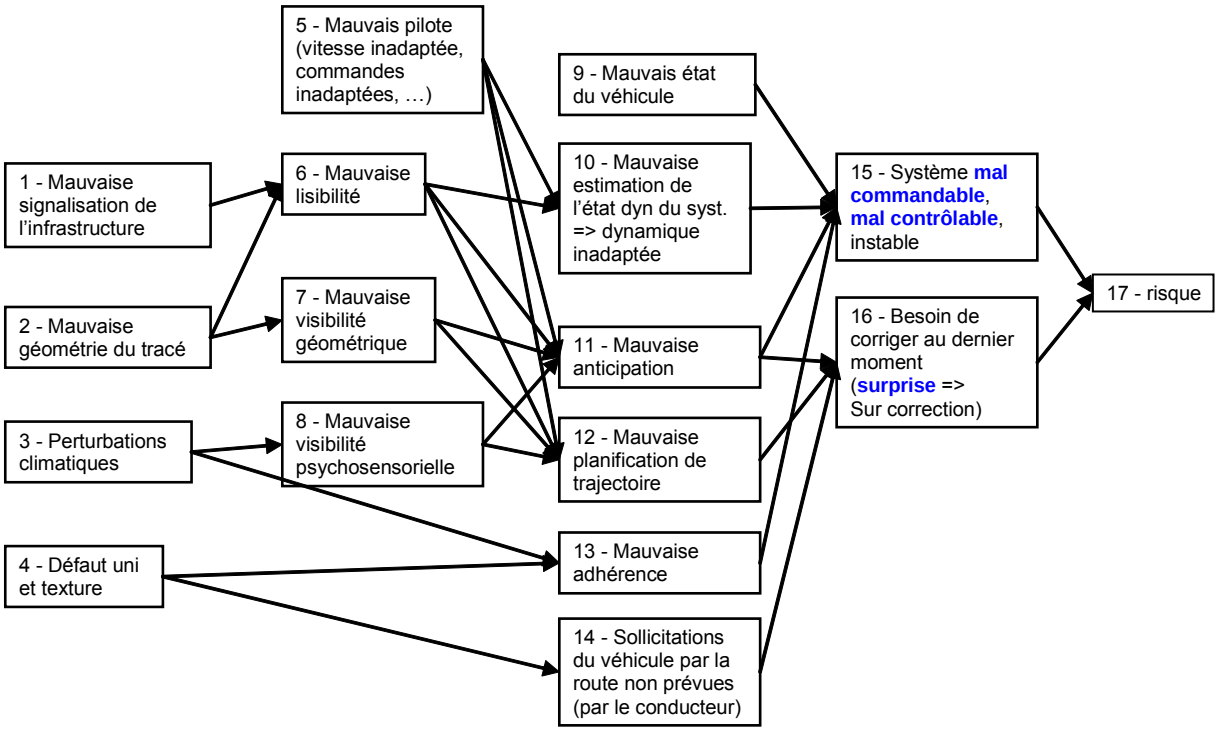


Figure 1 - Chaîne de causalité du risque de sortie de route

3.2 Présentation du formalisme logique utilisé par Nexyad

Le système d'évaluation prédictif de sortie de la route développé par Nexyad, implante cette chaîne de causalité et s'appuie pour cela sur la théorie des possibilités, dont nous rappelons ci-dessous les bases.

Nous considèrons le langage L prédicatif du premier ordre tel qu'utilisé par Kleene (1971), et l'ensemble L' des formules fermées de L comme Schönfinkel (1991) (NB : si nous sommes en logique propositionnelle Smullyan (1968) montre que L = L'). En pratique, on considère que le domaine d'interprétation des théories du langage L est fini, ce qui implique que L' soit aussi fini. Comme Dubois et Prade (2001), si nous appellons O l'espace des mondes possibles, O correspondant en pratique aux interprétations possibles du langage, alors en associaant une évaluation B à chaque formule f bien formée et fermée de L', on construit :

La possibilité P telle que, pour tout f de L', B = P(f) = sup o vérifie f P(o) (1)

La nécessité N vérifie pour tout f de L', N(f) = 1 – P(-f) (2)

La disjonction logique V de deux formules fA et fB $\Leftrightarrow$ fA V fB $\Leftrightarrow$ { N(fA V fB) >= max (N(fA), N(fB)) ; P(fA V fB) = max(P(fA), P(fB)) } (3)

La conjonction logique $\cap$ de deux formules fA et fB $\Leftrightarrow$ fA $\cap$ fB $\Leftrightarrow$ { N(fA $\cap$ fB) = min (N(fA), N(fB)) ; P(fA $\cap$ fB) <= min(P(fA), P(fB)) } (4)

Cette construction munit L' d'une double structure d'évaluation : en nécessité et en possibilité. L'intérêt de l'approche est que la logique possibiliste constitue une approche générale des logiques dites non-standards. Comme Dubois et Prade (2001) nous pouvons en particulier facilement définir des mécanismes de raisonnement non monotone repris de Cayrol, Lagasquie-Schiex et Schiex (1998). Cette approche nous permet de manipuler simplement des assertions du type « A peut causer B ». Cette manipulation est rendue simple par la double interprétation « langage » et « logique » qui permet d'attribuer une évaluation logique à une phrase de type « B est la conséquence de A » (exemple, dans notre application : « le Risque d'accident peut être une conséquence de la mauvaise adhérence de la chaussée »). Pour une logique de formules évaluées par des degrés de nécessité, une formule possibiliste est définie comme un couple (a, b) où a appartient à L' et b appartient à [0, 1]. Dans ce cas:

(a, b) signifie que N(a) >= b (5)

Nous appellons « théorie possibiliste » un ensemble fini de formules possibilistes. Dubois et Prade (2001) définissent alors la conséquence logique d'une théorie possibiliste F :

(a, b) est conséquence logique de F si et seulement si toute distribution de possibilité p vérifiant F vérifie également (a, b). (6)

3.3 Application à l'évaluation d'un risque possibiliste : utilisation du formalisme des ensembles flous

Nexyad a décidé d'utiliser la théorie des ensembles flous de Zadeh (1965) pour construire ses formules possibilistes telles que définies dans le chapitre précédent. Ceci se fait naturellement puisque comme le définit Zadeh (1965) l'opérateur d'appartenance fE d'un ensemble flou E (exemple : l'ensemble des cas risqués) est une fonction variant dans l'intervalle [0, 1]. Les atomes de langage de type « faible adhérence » ou « mauvaise visibilité » sont alors associés à

cette fonction fE qui peut être évaluée en possibilité et en nécessité comme cela est expliqué dans le chapitre précédent. On définit l'ensemble flou R des situations risquées, d'un point de vue de la sécurité routière. Pour notre « fonction de risque », nous n'avons retenu que l'évaluation possibiliste de f de fR, car elle est moins restrictive que l'évaluation en nécessité. Le principe de l'évaluation possibiliste des risques consiste à décomposer ce risque en composants élémentaires, puis à fusionner logiquement les évaluations. Dans ce paragraphe nous avons retenu, les facteurs suivants :

- la vitesse élevée du véhicule
- le faible rayon de courbure
- l'adhérence faible
- la visibilité faible

Chacun de ces facteurs donne lieu à la construction d'un ensemble flou qui est défini de façon unique par son opérateur d'appartenance, comme sur la figure 1.

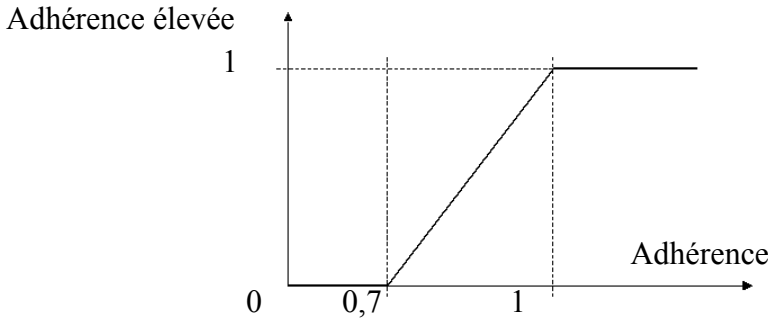


Figure 2 - Définition de l'opérateur d'appartenance: exemple pour l'adhérence élevée

La signification des valeurs de l'indicateur d'appartenance est :

- 0 : N'appartient pas à l'ensemble (c'est à dire : l'adhérence n'est pas élevée).
- 1 : Appartient à l'ensemble (c'est à dire : l'adhérence est élevée).

Cela donne lieu à la construction des 4 ensembles flous précités. Les paramètres de réglage de notre fonction sont les seuils de définitions de nos quatre opérateurs d'appartenance flous et de leurs complémentaires. Par exemple :

- Vitesse élevée : 0, 0, 130 (km/h); Vitesse Faible = C(Vitesse Elevée)
- Adhérence élevée : 0, 0.7, 1; Adhérence Faible = C(Adhérence Elevée)
- Visibilité élevée 0, 170, 1000 (m); Visibilité faible = C(Visibilité élevée)
- Rayon de courbure élevé : 0, 500, 3000 (m); Rayon de courbure Faible = C(Rayon de courbure élevé)

Comme pour Zadeh (1965) C(A) est le complémentaire flou de l'ensemble flou A. Le risque est alors défini logiquement :

Risque (est la conséquence de) : (Vitesse élevée ∩ Rayon de courbure faible) V (Vitesse élevée ∩ adhérence faible) V (Vitesse élevée ∩ visibilité faible) (7)

Où ∩ et V représentent respectivement la conjonction et la disjonction des cas.

L'évaluation possibiliste en possibilité de (7) est réalisée tel que présenté en (6) ce qui conduit à chaque instant à la construction d'un indice d'évaluation (que nous avons choisi d'appeler

« fonction de risque ») variant continûment entre 0 et 1. Cette possibilité de sortie de route correspond à :

- 0 impossibilité de sortir de la route,
- 1 il est très fortement possible de sortir de la route.

Une autre interprétation possible est le degré de surprise auquel le conducteur sera capable de faire face :

- Un risque nul indique que le conducteur pourra faire face à une forte surprise sans sortir de la route (ex : objet arrêté à la limite de la distance de visibilité).
- Un risque de 1 indique que le conducteur ne pourra conserver le contrôle de son véhicule si une surprise même minime survient (ex : faible resserrement d'un virage à la limite de la distance de visibilité).

3.4 Intégrations dans un module informatique

La base de connaissance et le moteur possibiliste ont été intégrés dans un module informatique (dll au format Microsoft Windows) appelable à partir de toute application informatique. La base de connaissance synthétisée par la chaîne de causalité a été retranscrite à l'aide du moteur possibiliste qui reprend les concepts décrits aux paragraphes 3.2 et 3.3. Le développement du moteur possibiliste est effectué en C++, en utilisant une modélisation UML standard des concepts. Les entrées du module obtenu sont les suivantes et détaillées dans Yahiaoui (2008) :

- Vitesse longitudinale en m/s.
- Accélération longitudinale en m/s².
- Accélération transversale courante en m/s².
- Distance de visibilité géométrique (Masquage de la route par le paysage) en m.
- Distance de visibilité atmosphérique (Présence ou non de brouillard) en m.
- Distance à l'obstacle le plus proche en m.
- Adhérence transversale mobilisable.
- Adhérence transversale mobilisée.
- Adhérence longitudinale mobilisable.
- Adhérence longitudinale mobilisée.
- Tableau des courbures correspondant au tableau des distances curvilignes.
- Tableau des distances curvilignes correspondant au tableau des courbures.
- Taille des tableaux Courbure et Distance.

4. Résultats expérimentaux et modes d'utilisation

Nous avons utilisé le simulateur de véhicules (CALLAS® de la société Oktal) et des données réelles de la Peugeot 307 de l'INRETS MA.

4.1 Résultats obtenus sur données simulées

La simultion (CALLAS®) de la figure 3 montre une sortie de route à 90 km/h en virage. Pour le même virage, la figure 4 montre l'évolution de notre fonction de risque pour plusieurs vitesses d'approche. La figure 5 illustre le parcours par le simulateur d'un itinéraire réel sélectionné dans le cadre du thème IRCAD de SARI et décrit par Anelli, Kerdudo, Gothié, Violette, Vigouroux, Aaron, Do (2006). Sur ce parcours, les simulations des figure 6 (passage à 50 km/h soit 14 m/s), figure 7 (passage à 80 km/h soit 22 m/s) montrent un bon comportement prédictif de notre fonction de risque.

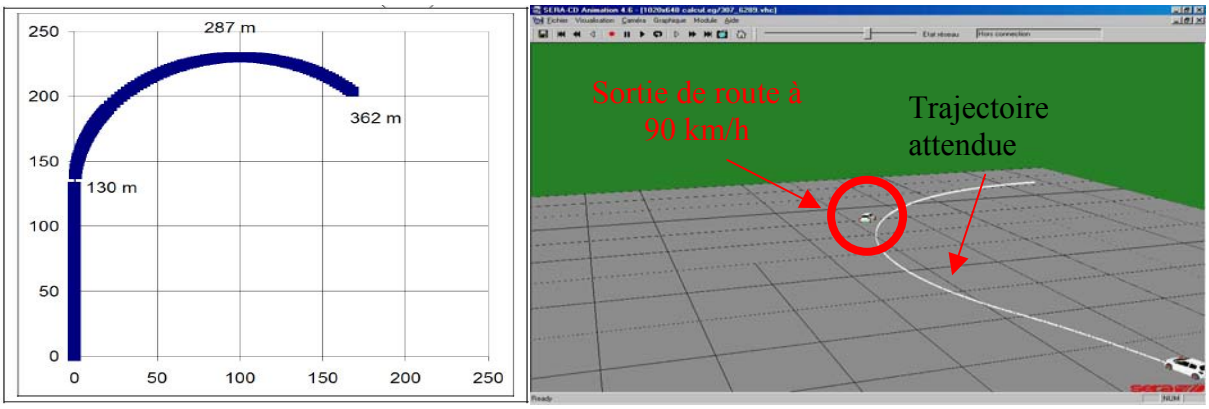


Figure 3 - A droite, un virage prolongeant une ligne droite. A gauche, le pilote du simulateur ne parvient pas à suivre la trajectoire pour une vitesse de 90 km/h.

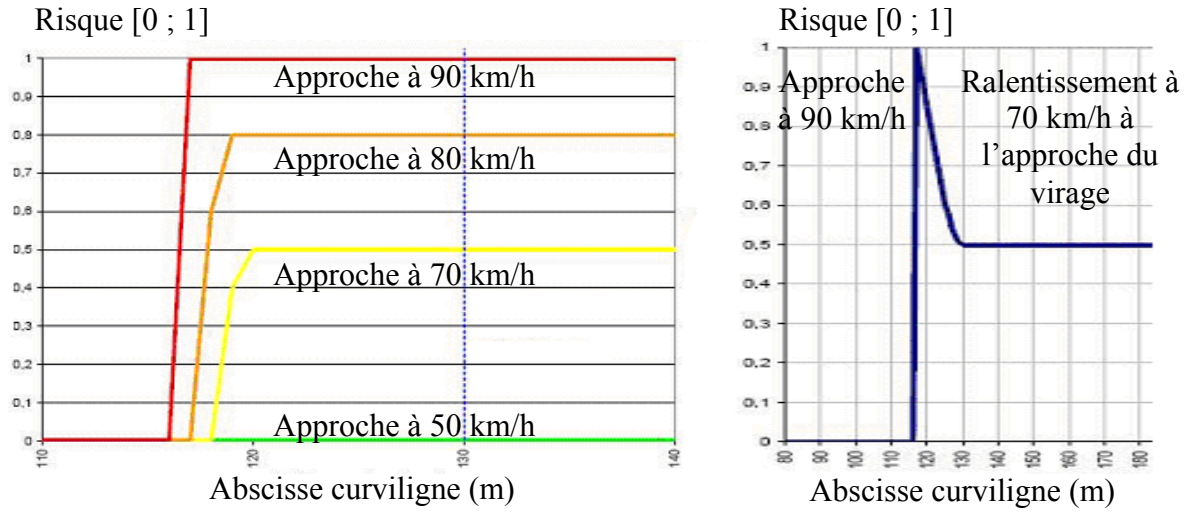


Figure 4 - Sortie de la fonction de risque pour différentes vitesses d'approches (gauche) et pour une approche à 90 km/h suivie d'un ralentissement à 70 km/h (droite).

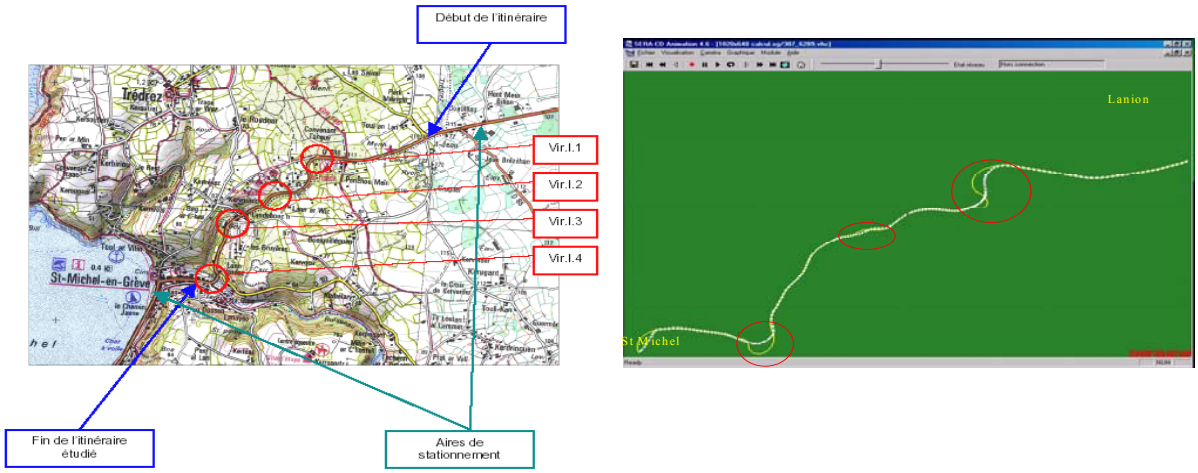


Figure 5 - Lanion vers St michel en Grève, forcé à 80 km/h le simulateur sort de la route

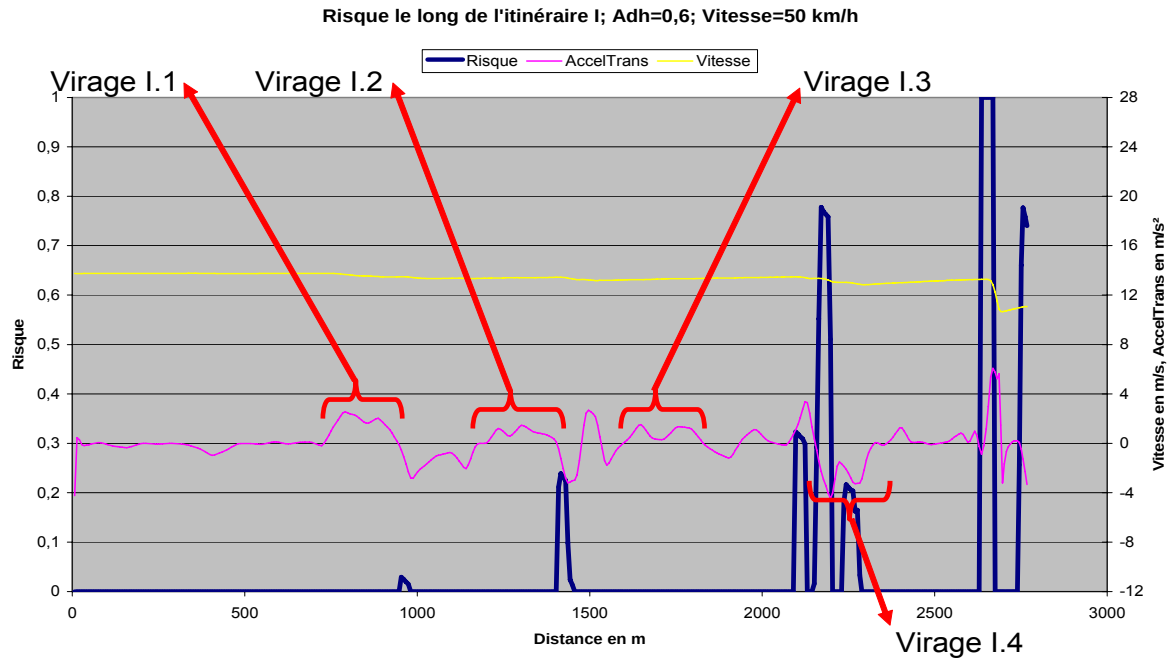


Figure 6 - Itinéraire Lanion vers St michel en Grève, passage à 50 km/h

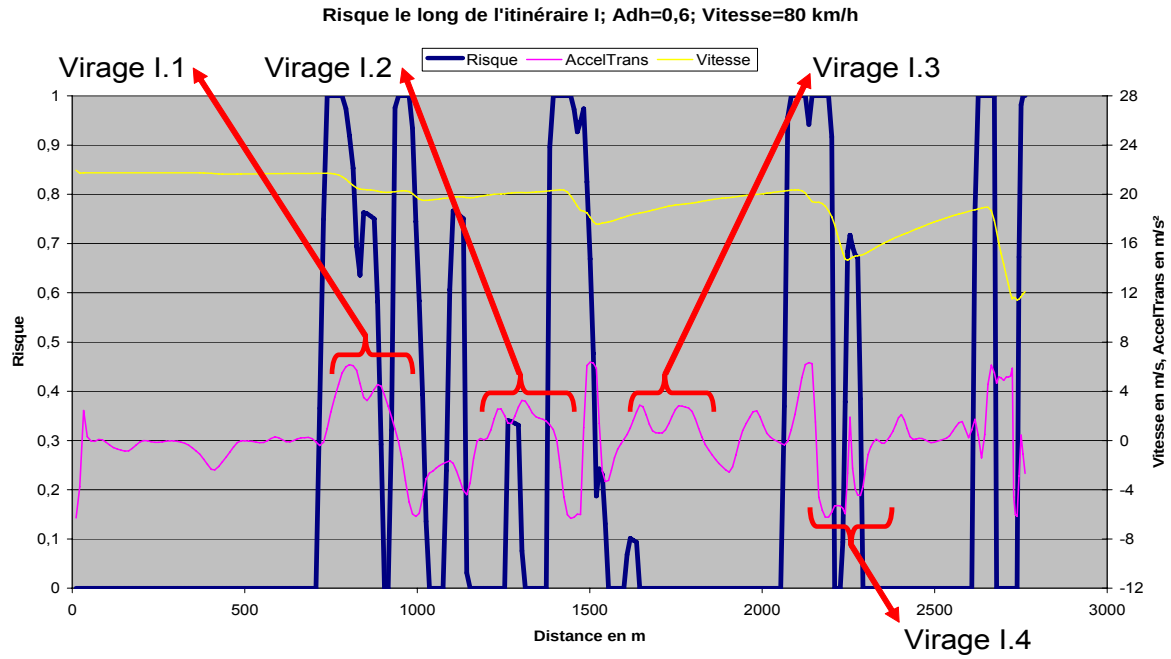


Figure 7 - Itinéraire Lanion vers St michel en Grève, passage à 80 km/h

4.2 Résultats obtenus sur données réelles

Lechner, Thomas, Baque, Barletta (2008), ont utilisé notre fonction de risque dans la Peugeot 307 de l'INRETS MA sur l'itinéraire RD8, Guingamp vers Bourbriac.

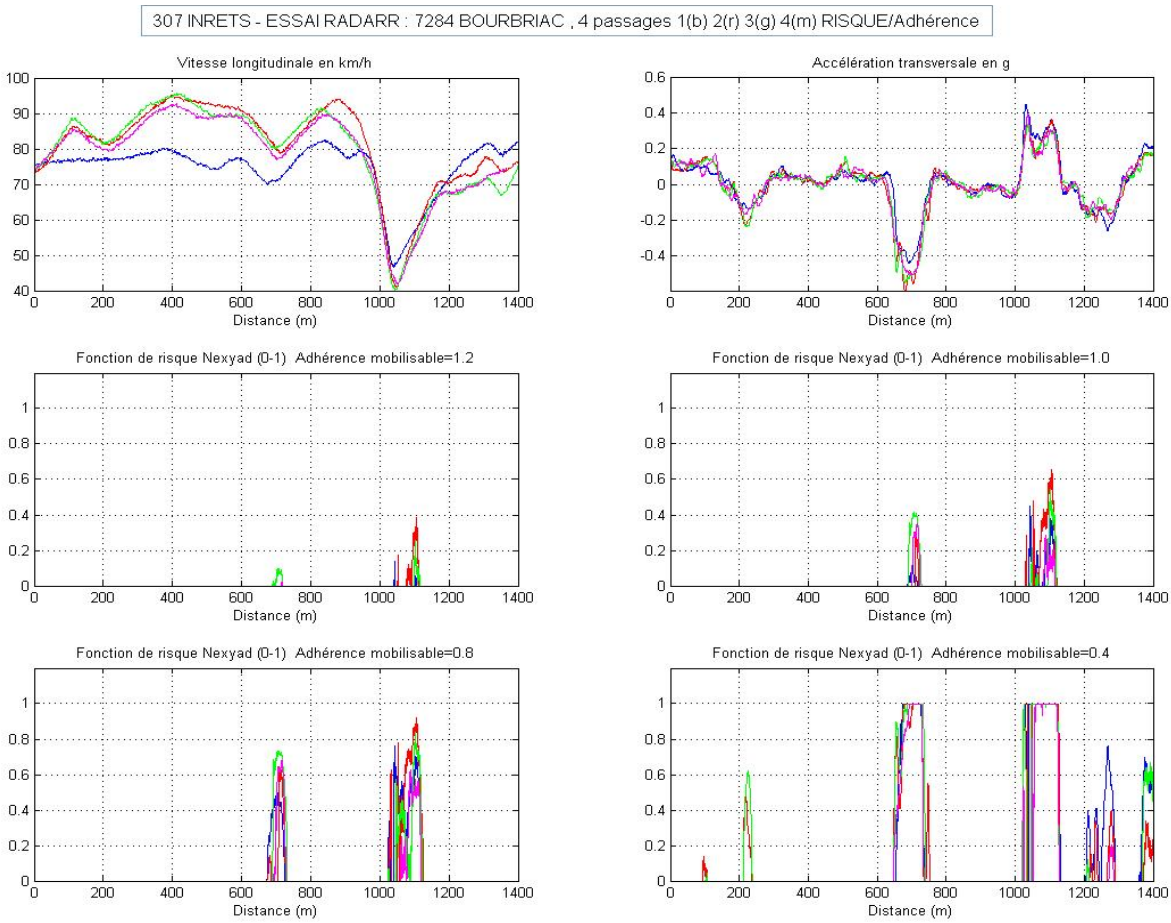


Figure 8 - Itinéraire RD8, Guingamp vers Bourbriac, passages avec différentes adhérences

Sur la figure 8, nous remarquons que l'indicateur de risque est assez souvent égal à 0, ce qui signifie que le conducteur garde toute latitude de réagir à des événements imprévus. Nous pouvons de même remarquer qu'à l'approche des virages importants l'indicateur croit et d'autant plus que l'adhérence est faible (graphiques du bas sur la figure 8).

4.3 Modes d'utilisation du module prédictif du risque

Dans le cadre d'une utilisation en temps réel, pour conserver une conduite sécuritaire, le conducteur devrait décélérer dès que l'indicateur de risque devient strictement positif.

Le gestionnaire d'infrastructure peut comme détaillé dans Yahiaoui (2007):

- Faire parcourir un itinéraire par le système de diagnostic avec une dynamique véhicule type, ex : vitesse constante à 60 km et ainsi identifier directement les zones ou la sécurité n'est pas suffisante pour rouler dans ces conditions. Ce qui permet soit d'identifier les points chauds qui devront faire l'objet d'aménagement, soit de valider l'aspect sécuritaire d'un itinéraire à la réception de travaux.
- Ou, simuler différents paramètres de dynamique véhicule et d'environnement (vitesse ; accélération; présence de brouillard, etc.) via des plans d'expériences et déterminer les jeux de paramètres pour lesquels le conducteur sera en danger en cas de survenance d'un événement imprévu. Ce qui permettrait là aussi de prévenir le conducteur en cas de réalisation de ces conditions.

5. Conclusion

Nous avons pu concevoir une fonction prédictive du risque de sortie de route.
Ses entrées sont hétérogènes. Nous avons utilisé des simulations pour réaliser des sorties de route et régler la dynamique de la fonction de risque.

Le système prend la forme d'un module informatique intégrable dans différents environnements informatiques (ex : bibliothèque dynamique sous Windows®, ou composant au format Rt-MAPS®) et sans contrainte de puissance de calcul importante. Sous cette forme il a donc pu être intégré dans l'environnement logiciel de la Peugeot 307 de l'INRETS (IRCAD et RADARR). Cette action a permis de valider la faisabilité de l'intégration du composant dans un contexte réel et de valider les résultats en situations réelles.

Les résultats des tests sur simulateur et en embarqué dans un véhicule ont validé quantitativement notre approche.

Différents modes d'utilisation sont possibles :

- Intégré dans un véhicule d'auscultation comme dans la 307 de l'INRETS MA, pour identifier des zones dangereuses.
- Embarqué dans un véhicule comme aide à la conduite (cette piste est explorée dans le projet FUI : MERIT).

Remerciements

Nous remercions les experts des CETE, du LCPC, de CAR&D et de l'INRETS pour avoir bien voulu répondre à nos questions et l'équipe de l'INRETS MA pour avoir intégré notre module dans leur véhicule ce qui a permis d'optimiser et valider nos résultats sur des cas réels de roulage.

Références

- Amat, J.L. et Yahiaoui, G. (2002), « Techniques avancées pour le traitement de l'information », éditions Cépaduès,
- Anelli, P., Kerdudo, K., Gothié, M., Violette, E., Vigouroux, P., Aaron, M., Do, M.T. (2006), « SARI IRCAD – Choix des itinéraires », 54p.
- Assar, S. (1995) « Méta-modélisation pour la transformation des schemas et la generation de code », these de docteur, Univ Pari VI.
- Beauzamy, B. (2004), « Méthodes probabilistes pour l'étude des phénomènes réels », éditions la SCM.
- Bootsma, R. (2003), « ARCOS Thème 6 rapport annuel 2003, mouvement et perception ».
- Cayrol, C., Lagasquie-Schiex, M.C., Schiex T. (1998), "Nonmonotonic reasoning: from complexity to algorithms", Annals of Mathematics and Artificial Intelligence, Kautz, Selman, eds. Baltzer Science Publishers, ftp://ftp.irit.fr/pub/IRIT/RPDMP/revueAMAI-98.ps.gz, Vol. 22 N. 3-4, 207-236.
- CETE de Lyon (2005), « Guide méthodologique démarche SURE, diagnostic de l'itinéraire et pistes d'actions », édition guides du SETRA.
- De Neuville, A., Bommel-Orsini, A. (2009), « Rapport d'études, Evaluation du risque routier par l'analyse de la lisibilité de la route », Collection « Les rapports » – Sétra.
- Do, M. T. (2009), « SARI Thème 3 IRCAD Rapport final », 25 p. GO 4 Technologies pour la sécurité du PREDIT 3.

- Dubois, D., Prade, H. (2001), "Possibility theory, probability theory and multiple-valued logics: A clarification. Dans: Annals of Mathematics and Artificial Intelligence", Eds Kluwer, Dordrecht, V. 32, 35-66.
- Ferrandez, F. et Yerpez, J. (1986), « Caractéristiques routières et sécurité ».
- Fleury, D., Peytavin, J-F., Brenac, T., Saint-Gérand, T., Blondel, C., Medjkane, M., Millot, M., Sauvaget, S., Delpierre, J., (2008), « Sécurité routière et analyse multi scalaire du territoire : rapport final du 12 janvier 2008 », GO 3 du PREDIT.
- INRETS (2005), « Les pertes de contrôle en courbe ».
- Kleene, S. (1971), « Logique mathématique », Armand Colin, ou Gabay (1987), ISBN 2876470055.
- Lechner, D., Thomas, D., Baque, L., Barletta, E. (2008), « SARI-RADARR-1.8.3 : Résultat de validation de l'implémentation expérimentale dans la 307 ».
- Lechner, D., Thomas, D., Baque, L., Barletta, E. (2008), « SARI-RADARR-3.4.3 : Rapport de qualification du système complet ».
- Lechner, D., Thomas, D., Baque, L., Barletta, E. (2008), « SARI-RADARR-3.4.4 : Compte rendu avec fichiers des mesures effectuées dans les Côtes d'Armor ».
- Lefeuvre, R. (2004), « ARCOS Thème 7 Acceptabilité sociale et juridique ».
- Massieur J.F. et Dorléans, P. (1998), « Modélisation et analyse des systèmes linéaires », Technosup.
- Page, Y. (2004), « ARCOS Thème Accidentologie ».
- Predit (2002), Accidents par temps de pluie.
- Schaefer, G. (2003) « SARI-RADARR-Sécurité routière, proposition technique de l'approche embarquée ».
- Schönfinkel, M. (1990), « Sur les éléments de construction de la logique mathématique. » Mathématiques et Sciences Humaines, 112, 5-26.
- SETRA (1998), « Accidents en virage sur routes bidirectionnelles interurbaines ».
- Smullyan, R. (1968), "First Order Logic", Dover Publications, New-York.
- Viola, C. (2003) « Le comportement de conduite par temps de brouillard », Actes journées Scientifiques Brouillard et Visibilité Routière Paris LCPC, INRETS.
- Yahiaoui, G. (2007), « SARI-IRCAD-Nouvelle méthodologie de diagnostic préventif à grand rendement des risques d'accidents liés au facteur conditions atmosphériques », 26p.
- Yahiaoui, G. (2008), « SARI-RADARR-Le manuel utilisateur de la méthodologie de diagnostic préventif à grand rendement », 20p.
- Yahiaoui, G., Dupre, G., Lechner, D., Naude, C., Schaefer, G. (2006), « SARI-IRCAD-Fonction de risque : recueil de l'expertise sur la causalité du risqué », 22p.
- Yahiaoui, G., Pierre Da Silva Dias (2003), "On board visibility evaluation for car safety applications : a human vision modeling – based approach", Congrès ITS Madrid.
- Zadeh (1965), "Fuzzy Sets, Information and Control", vol 8, 338-353.

SESSION 2

Caractérisation du risque routier vis à vis de l'infrastructure

Animateur : Christophe Denouailles (SETRA)

EVALUATION FIABILISTE DE LA STABILITE DES TRAJECTOIRES DE VEHICULES EN VIRAGE

G. REY

D. CLAIR
LaMI
Aubière, France

M. FOGLI

F. BERNARDIN
CETE Lyon
Clermont-Fd, France

Résumé

Menés dans le cadre du projet national SARI/RADARR, les travaux présentés ont pour objectif la détermination des trajectoires critiques susceptibles de provoquer des accidents de type sortie de route en virage, en vue de la mise en place d'un système d'alerte. Cette étude est basée sur un ensemble de trajectoires expérimentales, relevées sur le trafic réel, ainsi que sur des trajectoires simulées via un modèle dynamique. Des variables et processus aléatoires sont introduits dans ce modèle pour refléter le caractère incertain induit par le conducteur, le véhicule et l'infrastructure. Le recours à des méthodes fiabilistes permet alors l'évaluation d'indicateurs du risque de sortie de route à moindres coûts, comparés à ceux liés à l'emploi d'une méthode de Monte-Carlo. Les résultats de ces travaux sont une carte d'évolution du risque de violer des critères de sécurité en fonction des conditions initiales pratiquées par les conducteurs en entrée de virage. Ceci permet l'identification des situations à risque en amont du virage, qui pourront alors entrainer un déclenchement d'alerte destiné à inviter le conducteur à modifier la trajectoire prévue.

Mots-clés: Sécurité routière, dynamique véhicule, fiabilité, Monte-Carlo

Abstract

This study was carried out within the framework of the French project RADARR/SARI which aims to identify the critical trajectories that can lead to a roadway departure while cornering, in order to control a warning system. This study is based on both experimental and simulated trajectories. A specific vehicle dynamics model is developed, and uncertainties arising from the driver, the vehicle and the road infrastructure are modeled by random variables and a stochastic process. Use is made of structural reliability methods in order to evaluate a risk index at a low computational cost, compared to Monte-Carlo methods. The result is a gradation of the risk to violate safety criteria as a function of the initial conditions at the entrance of the curve. This allows identifying risky situations before the curve negotiation and an alarm can be triggered so that the driver modifies its intended trajectory.

Keywords: Road safety, vehicle dynamics, reliability, Monte-Carlo

1. Contexte

Cette étude est menée dans le cadre du projet RADARR/SARI dont l'objectif est la mise en place sur des itinéraires routiers d'un système d'information alertant les conducteurs d'un risque de perte de contrôle de leur véhicule. L'application principale de ce dispositif concerne les sorties de route de véhicules légers en virage, causes de 30% des accidents mortels au cours de l'année 2008. Le déclenchement d'alertes efficaces engendre deux difficultés principales. D'une part ce système doit prévenir les conducteurs suffisamment tôt, capter leur attention et les inciter à modifier leur conduite. D'autre part, la variabilité intrinsèque au triplet *conducteur-véhicule-infrastructure* doit être prise en compte pour l'obtention de résultats réalistes.

La prévention de sortie de route est un champ de recherche actif (Leblanc and al., 2006, Pilutti and Ulsoy, 2003, Zhou and al., 2008) généralement basé sur des systèmes de caméra et/ou de positionnement GPS pour déterminer la configuration du véhicule sur la chaussée (position, vitesse, orientation, etc), des algorithmes déterministes permettant alors de détecter des situations potentiellement dangereuses. Par rapport à ces études, l'originalité du travail présenté ici porte sur deux points. Premièrement, dans le cadre du projet RADARR, l'équipement embarqué dans le véhicule doit être minimisé afin de faciliter l'implémentation du système. Ceci impose dans la démarche proposée que les variables nécessaires à la détermination du risque de sortie de route puissent être mesurées depuis le bord de route. Deuxièmement, le cadre probabiliste permet une quantification du risque, ce qui est une aide à la décision précieuse pour le choix de déclenchement d'alertes. L'application de méthodes probabilistes dans le domaine de la dynamique du véhicule, et plus spécifiquement de la sécurité routière est encore peu développée. Les travaux existants concernent principalement le comportement des suspensions (Sandu et al., 2006) sans étude sur l'impact sur la trajectoire, et les risques de collisions inter-véhicule (Eidehall and Petersson, 2006) qui utilisent des modèles dynamiques généralement simples. Les plus proches études concernent les risques de retournement de poids lourds (Sellami et al., 2008) et les risques de retournements liés au vent en Islande (Snaebjörsson and al., 2007). Cependant le cadre de ces études est soit une évaluation continue du risque, qui nécessite donc un équipement embarqué conséquent, soit une démarche post-accidentelle.

La démarche menant à l'évaluation du risque de sortie de route comporte trois étapes. Premièrement un dispositif de mesure renseigne sur la trajectoire d'approche (position et vitesse) du véhicule à l'entrée du virage. Deuxièmement, à partir de ces mesures, une trajectoire de référence représentant le comportement moyen d'un conducteur standard est déterminée. Troisièmement, l'ajout de perturbations (variables aléatoires et processus stochastiques) dans les paramètres du modèle dynamique de véhicule permet la simulation d'une famille de trajectoires dispersées autour de la trajectoire de référence. A partir de cette famille et de critères de sécurité, des indicateurs de sortie de route sont évalués par des méthodes fiabilistes (Ditlevsen and Madsen, 1996). La valeur de ces indicateurs permet alors de prendre la décision d'alerter ou non le conducteur.

2. Modélisation mécanique

2.1 Modèle dynamique de véhicule

Le modèle dynamique développé est basé sur le modèle *lacet-dérive-roulis* (Brossard, 2006) choisi pour son coût numérique réduit et sa précision. Le positionnement du véhicule est repéré par l'angle d'orientation θ et l'angle de dérive α (voir Figure 1). Le conducteur impose la

trajectoire du véhicule par l'angle de braquage β et la vitesse V. L'angle de roulis est paramétré par l'angle φ.

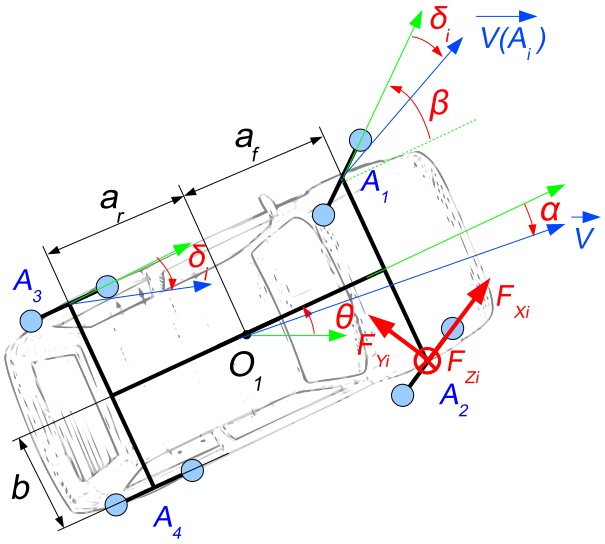


Figure 1 – Schéma du modèle de véhicule

Trois améliorations ont été apportées à ce modèle, afin de simuler plus précisément les trajectoires à la limite de la stabilité :

- Contact roue/sol : l'expression des forces latérales des pneumatiques tient compte des non-linéarités par rapport à l'angle de dérive (*magic formula*, Pacejka, 2002), aux forces normales (*similarity method*, Radt and Milliken, 1983), et aux forces longitudinales en assurant que la résultante horizontale reste dans le cercle d'adhérence.
- Suspensions : l'angle de roulis est calculé à partir des caractéristiques des trains roulants (ressort, amortisseur et anti-roulis), et permet la prise en compte des braquages induits (Gillepsie, 2002).
- Commande et infrastructure réalistes : afin de simuler fidèlement la négociation du virage, les commandes du conducteur (freinage, braquage) sont variables. Les caractéristiques de l'infrastructure (dévers, pente) sont issues de relevés VANI (Véhicule d'ANalyse d'Itinéraires).

Afin de s'assurer de la validité des trajectoires simulées, les résultats ont été comparés à ceux fournis par le logiciel PROSPER/CALLAS sur un modèle de Peugeot 406 validé expérimentalement (Lechner and al., 1997). Sur une simulation de 10 s, où l'angle de braquage aux roues augmente linéairement de 0 à 1° pendant 2.5 s puis reste constant ensuite, l'écart latéral maximal entre les trajectoires du modèle et de PROSPER/CALLAS est inférieur à 20 cm jusqu'à la vitesse de 90 km.h^{-1}. A cette vitesse l'accélération latérale est de 3 m.s^{-2}, ce qui valide l'utilisation de ce modèle simple pour des sollicitations dynamiques courantes.

2.2 Trajectoire de référence

Les commandes du conducteur sont calculées à partir de la donnée d'une trajectoire de référence. Afin de refléter au mieux les comportements possibles des conducteurs, cette trajectoire doit être liée aux conditions d'entrée du véhicule dans le virage (vitesse et position latérale). Une définition théorique de cette trajectoire est difficilement possible de par la dépendance à de nombreux facteurs (style de conduite, conditions de visibilités, état de la chaussée, …). Il a donc été choisi de définir la trajectoire de référence à partir de relevés expérimentaux sur trafic réel.

Mesures de trajectoires

Une campagne de mesure, réalisée sur le trafic réel pendant deux jours au moyen de caméras et de télémètres (Goyat and al., 2006) a permis la création d'une base de données de 400 trajectoires. Le virage étudié est une courbe à droite située sur la Rd8 entre Guingamp et Bourbriac (Figure 2), où la vitesse est limitée à 90 km/h. Les relevés de vitesse montrent que 85% des conducteurs abordent le virage avec une vitesse inférieure à 67km/h, bien en deçà de la limitation. La signalisation laisse donc une part d'interprétation au conducteur dans le choix de la vitesse qu'il estime adaptée, ce qui peut mener à des situations dangereuses. Ce virage constitue donc une application type du projet SARI/RADARR.

Figure 2 – Virage étudié

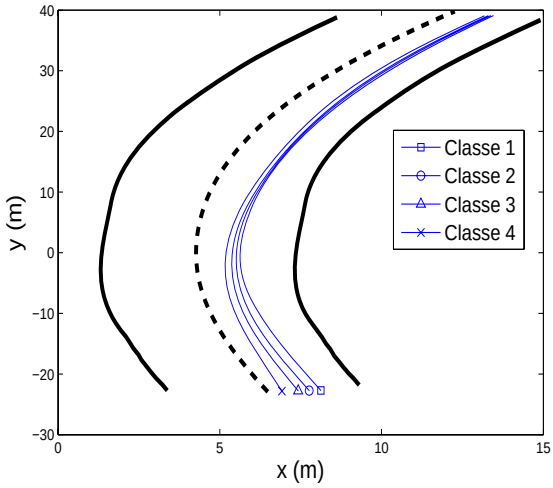


Figure 3 – Trajectoires de référence (échelle non respectée)

Classes de conducteur

Les trajectoires mesurées sont séparées en 4 classes de conducteurs selon les vitesses et positions initiales mesurées en entrée de virage. Dans chaque classe, la trajectoire de référence est définie comme la moyenne des trajectoires mesurées. Les résultats sont présentés sur la figure 3. Les classes sont numérotées de l'intérieur (Classe 1) vers l'extérieur (Classe 4). Etant données la vitesse et la trajectoire de référence, le braquage correspondant β_0 est obtenu pas à pas par inversion du modèle dynamique par une méthode de Newton-Raphson.

2.3 Critères de sécurité

Des critères de sécurité sont utilisés pour détecter les trajectoires dangereuses parmi les trajectoires simulées. A la différence des études déterministes (Leblanc and al., 2006, Pomerleau and al. 1999) généralement basées sur des critères évolués (Curve Speed Warning et Time to Line Crossing étant les plus répandus), il a été choisi ici un critère simple afin de faciliter la présentation de la méthode et l'interprétation des résultats. Il est important de noter que, l'évaluation de ces critères étant réalisée sur des trajectoires simulées, des modifications peuvent être apportées sans aucune incidence sur la méthodologie proposée.

Le critère utilisé pour cette étude est basé sur la position latérale d du véhicule sur la chaussée, déduit des trajectoires simulées du modèle de véhicule. Il est défini par :

$$\bar{d} - \sup_{t\in[0,T]} \left|d(t)\right| > 0 \qquad (1)$$

où T représente le temps total de simulation et $\bar{d}$ le seuil admissible. Pour cette application, $\bar{d}$ est égal à la demi-différence entre la largeur de la voie et la largeur du véhicule.

3. Modélisation probabiliste

Certains des paramètres et des entrées du modèle déterministe présentent un caractère aléatoire lié aux incertitudes affectant le triplet *conducteur-véhicule-infrastructure*. Il est nécessaire d'en tenir compte par l'intermédiaire d'une modélisation adaptée. Une étude précédente (Rey et al., 2009) justifie le choix des paramètres aléatoires présentés ci-dessous.

3.1 Paramètres du modèle

Les 4 paramètres du modèle les plus influents sur la variabilité de la position latérale sont :
- M : Masse totale embarquée
- a_r : Distance du centre de gravité à l'essieu arrière
- D_0 : Perturbation sur la position latérale
- V_0 : Perturbation sur la vitesse longitudinale

Ces paramètres sont modélisés par des variables aléatoires mutuellement indépendantes dont les caractéristiques (lois, moyennes, écart-types) sont données dans le tableau 1.

Tableau 1 – Caractéristiques statistiques des variables aléatoires.

Paramètre		Loi	Unité	Moyenne	Ecart-type
M	Masse totale embarquée	Lognormale	kg	1610	16
a_r	Position du centre de gravité	Lognormale	m	1.532	0.01
D_0	Perturbation de la position	Uniforme	m	0	0.08
V_0	Perturbation de la vitesse	Uniforme	$km.h^{-1}$	0	1

3.2 Commande du conducteur

Les oscillations perturbatrices induites par les actions du conducteur sur le volant sont modélisées par un processus aléatoire ψ. L'angle de braquage appliqué aux roues s'écrit donc : $\beta = \beta_0 + \psi$, où β_0 est le braquage initialement prévu par le conducteur, déduit du choix de la trajectoire de référence. Le processus ψ est choisi borné, stationnaire et de moyenne nulle, indépendant des variables aléatoires précédemment introduites, et tel que $\forall t \in$:

$$\psi(t) = \varepsilon \sin(\upsilon t + \sigma W(t) + 2\pi\theta) \qquad (2)$$

où $\varepsilon, \upsilon, \sigma$ sont des constantes réelles positives, W est un processus de Wiener standard réel et θ une variable aléatoire uniforme sur [-0.5,0.5] indépendante de W. Les constantes $\varepsilon, \upsilon, \sigma$ sont obtenues par identification à partir des trajectoires mesurées.

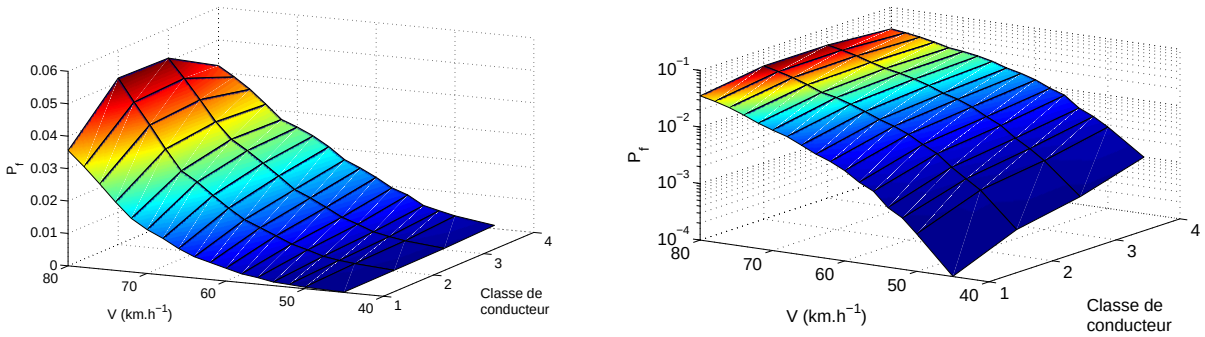
4. Estimation du risque

L'introduction de l'aléa dans le modèle dynamique rend la sortie du modèle également aléatoire, donc le résultat des simulations est une famille de trajectoires probables de la négociation du virage. Le but de cette étude est d'estimer, à partir des trajectoires simulées, la probabilité P_f que le critère de sécurité soit violé, soit :

$$P_f = \Pr\left(\left\{\sup_{t\in[0,T]}\left|d(t)\right| \geq \bar{d}\right\}\right) \qquad (3)$$

Cette probabilité est estimée d'une part en utilisant une méthode de Monte-Carlo (Rubinstein and Kroese, 2007), considérée comme valeur de référence, et d'autre part en ayant recours aux méthodes fiabilistes FORM/SORM (Der Kiureghian and al., 1987, Ditlevsen and Madsen, 1996), permettant un important gain en temps de calcul.

Afin de construire une carte d'évolution du risque, cette probabilité P_f est calculée pour des vitesses d'entrée variant entre 45 et 80 km.h^{-1} dans chaque classe de conducteur. Les résultats issus des simulations de Monte-Carlo sont présentés sur la figure 4, en échelle linéaire et logarithmique. En fonction des conditions initiales, la probabilité P_f varie de 10^{-4} à 5.10^{-2}. On observe une influence partagée de la vitesse et de la classe de conducteur, évoluant dans le sens d'une augmentation de P_f. L'effet aggravant de la vitesse sur le risque de sortie de route en virage est évidemment un phénomène déjà clairement identifié, mais la méthodologie proposée ici renseigne sur la gradation du niveau de risque en fonction des conditions initiales. Ceci peut difficilement être obtenu par une étude déterministe ou des analyses statistiques post-accidentelles.



a) échelle linéaire b) échelle logarithmique

Figure 4 – Evolution de P_f en fonction des conditions initiales

La comparaison des résultats de référence obtenus par la méthode de Monte-Carlo à ceux issus des approximations FORM et SORM est présentée sur la figure 5. On peut noter que les résultats issus de FORM (First Order Reliability Method), basés sur une approximation linéaire, surestiment grandement la probabilité P_f. Par contre, ceux fournis par SORM (Second Order Reliability Method) basés sur un développement quadratique, ont une précision acceptable pour l'application envisagée. En utilisant la méthode SORM, le calcul d'une probabilité (i.e. un point des surfaces de la figure 4) nécessite environ 220 trajectoires simulées, ce qui représente 0.15 s de temps de calcul sur un PC standard (2 GHz) en utilisant le modèle dynamique spécifiquement développé. Ceci peut donc être compatible avec une application temps réel, toutefois cette démarche conduirait à effectuer de nombreuses fois les mêmes calculs. Il parait donc plus intéressant de construire directement la base de données des probabilités P_f en fonction des conditions initiales possibles en entrée de virage (i.e. Les surfaces complètes de la figure 4). Ceci nécessite alors environ 15000 simulations de trajectoires par la méthode SORM, comparé à 10^8 trajectoires par Monte-Carlo. Cette réduction de temps de calcul permet d'une part d'envisager l'application de cette méthodologie à de nombreux virages considérés comme dangereux du réseau routier, et d'autre part d'envisager l'utilisation d'un modèle dynamique plus complet, ce qui était impossible avec une méthode de Monte-Carlo.

5. Mise en œuvre

Dans le contexte du projet SARI/RADARR, l'indice de risque introduit dans cette étude constitue un outil d'aide à la décision efficace pour le déclenchement d'alertes ciblées aux conducteurs. Cela implique le choix d'une valeur admissible pour la probabilité P_f, problème qui nécessite une expertise qui ne relève pas de la présente étude.

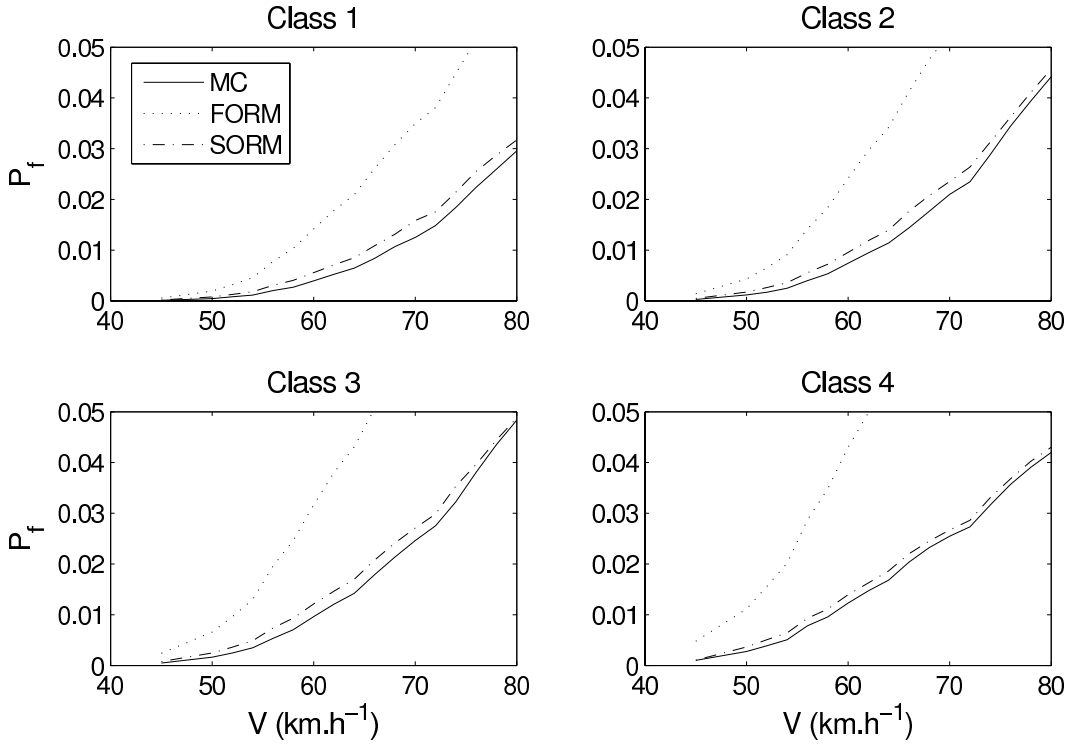


Figure 5 – Comparaison des résultats issus de Monte-Carlo, FORM et SORM

A titre d'illustration, le seuil de 2.10^{-2} en valeur de probabilité alerterait les conducteurs excédant:

- 74 km.h^{-1} pour la classe 1
- 70 km.h^{-1} pour la classe 2
- 67 km.h^{-1} pour la classe 3
- 65 km.h^{-1} pour la classe 4

La vitesse d'alerte varie de quasiment 10 km.h^{-1} selon la classe de conducteur considérée. Cette plage de vitesse étendue justifie ce type d'alerte ciblée selon les conditions initiales.

6. Conclusion

Les résultats obtenus dans cette étude montrent l'intérêt de l'application de méthodes probabilistes à la problématique de la sécurité routière. Le modèle dynamique spécifiquement développé permet l'introduction de l'aléa sur des paramètres ayant un sens physique. Ainsi, l'identification des caractéristiques statistiques à partir de relevés sur le trafic réel est facilitée. Le recours aux mesures dispense aussi de certaines étapes de modélisation aux résultats incertains, telles que la définition de la trajectoire de référence.

En vue de piloter un dispositif de déclenchement d'alerte, la connaissance de l'évolution de la probabilité de violer des critères de sécurité en fonction de la vitesse et de la position initiales constitue un outil d'aide à la décision important. En effet, une fois choisi un niveau de risque

acceptable, ces résultats permettent d'identifier les conditions initiales sûres. Le cas échéant, un avertissement peut alors être adressé au conducteur, l'invitant à modifier sa trajectoire.

Les perspectives de cette étude concernent en premier lieu la poursuite de la réduction du coût numérique, pour cela il est envisagé d'avoir recours à des méthodes de linéarisation stochastique. Ceci permettrait alors l'emploi de simulateurs dynamiques de véhicules complets représentant plus fidèlement les cas de sollicitations élevées.

Remerciements

Ce travail a été mené dans le cadre de la tâche 1.3 du projet SARI/RADARR.

Références

- Brossard, J. (2006), « Dynamique du véhicule », Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Der Kiureghian, A., Kin, H.Z. and Hwang, S.J. (1987), "Second-order reliability approximations", Journal of Engineering Mechanics, 113, 1208-1225.
- Ditlevsen, O. and Madsen, H.O. (1996), "Structural reliability methods", J. Wiley & Sons Inc.
- Eidehall, A. and Petersson, L. (2006), "Statistical threat assessment for general road scenes using monte carlo sampling", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 9, 167-147.
- Gillepsie, T. (2002), "Fundamentals of Vehicle Dynamics", Warrendale SAE.
- Goyat, Y. and Chatea, T. and Malaterre, L. and Trassoudaine, L. (2006), "Vehicle trajectories evaluation by static video sensors", 9th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems.
- Leblanc, D. and al. (2006), "Road departure crash warning system field operational test : methodology and results", Technical Report, UMTRI.
- Lechner, D., Delanne, Y., Schaefer, G. et Schmitt, V. (1997), « Méthodologie de validation du logiciel de dynamique automobile callas », Ingénieurs de l'automobile, 713 : 42-48.
- Pacejka, H. (2002) « Tyre and Vehicle Dynamics », Warrendale SAE.
- Pilutti, T. and Ulsoy, A. (2003), "Fuzzy-logic based virtual rumble strip for road departure warning systems", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 4, 1-12.
- Pomerleau, D. and al. (1999), "Run-off-road collision avoidance using IVHS counter-measures", Technical Report, NHTSA.
- Radt, H. and Milliken, W. (1983), "Non-dimensionalizing tyre data for vehicle simulation", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers.
- Rey, G. et Clair, D., Fogli, M. et Bernardin, F. (2009), « Evaluation probabiliste du risque de sortie de route en virage », XIX° Congrès Français de Mécanique, Marseille, 24-28 Août.
- Rubistein, R.Y. and Kroese, D.P. (2007), "Simulation and the Monte Carlo method", J. Wiley.
- Sandu, A., Sandu, C., and Ahmadian, M. (2006), "Modeling multibody dynamics systems with uncertainties, part 2 : Numerical applications", Multibody System Dynamics, 15, 360-391.
- Sellami, Y., Imine, H., Cadiou, J-C. et El-Hadri, A. (2008), « Evaluation du risque de renversement de poids lourds par indice de fiabilité », Conférence Internationale Francophone d'Automatique (CIFA 2008), Bucarest, Roumanie, 3-5 Sept.
- Snaebjörsson, J., Baker, C. and Sigbjörsson, R. (2007), "Probabilistic assessment of road vehicle safety in windy environments", J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 95, 1445-1462.
- Zhou, Y., Xu, R., Hu, X. and Ye, Q. (2008), "A lane departure warning system based on virtual boundary", Journal of Information Science and Engineering, 24, 293-305.

PREDICTION DES TRAJECTOIRES DEFAILLANTES EN UTILISANT DES TECHNIQUES D'IDENTIFICATION STOCHASTIQUE

A. KOITA **D. DAUCHER** **M. FOGLI**
LEPSIS (LCPC/INRETS) LAMI / UBP
Paris, France Clermont Ferrand, France

Résumé
Ce papier présente une nouvelle approche de modélisation des trajectoires de véhicules en virage à partir de données expérimentales. Dans un premier temps, nous allons décrire le plan d'expérience mis en oeuvre pour recueillir les trajectoires expérimentales. Ensuite, on expliquera les algorithmes de classification utilisés pour répartir les trajectoires en plusieurs classes différentes. Et puis, on va associer un modèle à chaque classe de trajectoires en utilisant des techniques d'identification stochastique. Cette procédure originale de modélisation des trajectoires couplée à l'analyse fiabiliste permettra d'associer une probabilité de défaillance à chaque classe de trajectoires identifiée. Enfin, un modèle de reconnaissance de trajectoires sera développé afin d'affecter chaque trajectoire à une classe et donc à un niveau de sécurité déjà connu.

Mots-clés: Sécurité routière, trajectoires expérimentales, classification, analyse et modélisation stochastiques, machines à supports vectoriels.

Abstract
This paper discusses a new approach to vehicle trajectories modeling starting from the experimental trajectories. Firstly, we use an experimental design in order to obtain discrete observations of representative trajectories. Then, we will use clustering method in order to distribute observed trajectories in several class of trajectories. Each identified class is governed by an unique stochastic process. Afterwards, stochastic identification techniques will be used to model each process. Then, this original procedure of modeling coupled to reliability engineer analyzes allowed to estimate a probability of failure for each identified class of trajectories. Lastly, we developed trajectories recognition model in order to assign each trajectory to a class and thus to an already known security level.

Keywords: Road safety, experimental trajectories, clustering, stochastic analysis and modeling, Support Vectors Machines.

1. Introduction

Les accidents de la route requièrent l'attention des pouvoirs publics et de l'industrie automobile. Les accidents dus à une perte de contrôle ont des conséquences très graves en terme humain pour les usagers de la route. Les statistiques montrent que 18% des accidents de la route et 1/3 des accidents mortels en France ont eu lieu en virage (BAAC, 2006). Plusieurs travaux de recherche sur les pertes de contrôle consistent à définir une vitesse critique à respecter en fonction des caractéristiques de la route et de l'état dynamique du véhicule (Glaser, 2004). D'autres travaux consistent en utilisant un modèle dynamique de véhicule, à effectuer une analyse de sensibilité afin de déterminer les paramètres les plus influents de la réponse de ce modèle (Lauffenburger, 2003). Le reproche fait à ce type de travaux est d'être non seulement très difficilement validable actuellement sur le terrain mais aussi fait intervenir des problèmes non-linéaires très difficilement modélisables par approche mécanique.

Par ailleurs, dans le cadre de l'opération de recherche MTT (Métrologie des Trajectoires et du Trafic), le LCPC a déployé des observatoires de trajectoires en virage afin d'analyser la stabilité des trajectoires et de détecter les trajectoires défaillantes. L'objectif de cette étude est de construire des modèles de trajectoires simples et robustes à partir de données de mesures en utilisant les techniques d'identification stochastique. Ces modèles sont spécifiques à des classes de trajectoires judicieusement identifiées. Chaque classe correspond à un comportement de conduite différent. Ensuite, la défaillance des trajectoires a été étudiée comme un problème fiabiliste, en identifiant plusieurs critères de défaillances via des fonctions d'états limites associées. A chaque critère de défaillance est associé un unique processus stochastique scalaire normalisé, faiblement stationnaire et ergodique. Les processus sont caractérisés à partir des observations expérimentales. Et puis, chaque processus a été identifié par une approximation basée sur un développement de la densité de probabilité sur la base hilbertienne des polynômes d'Hermite normalisés. Ce choix de modélisation permet de prendre en compte la grande variabilité du triplet Véhicule, Infrastructure et Conducteur (VIC). Il permet également de s'affranchir d'éventuelles difficultés dans l'alimentation des paramètres gouvernant le modèle. Enfin, cette procédure originale de modélisation couplée à l'analyse fiabiliste a permis d'associer une probabilité de défaillance à chaque classe de trajectoires. D'un point de vue applicatif, nous avons développé des méthodes de reconnaissance de trajectoires (à partir d'observations partielles, par exemple des données de mesures en entrée de virage) afin de pouvoir affecter chaque trajectoire à une classe identifiée et donc à une probabilité de défaillance notée P_f déjà connue.

2. Recueil de données de mesures

Le but de cette expérimentation est de recueillir un important panel de trajectoires se rapprochant de celles pratiquées en situation de conduite naturelle « naturalistic driving ». Le LCPC dispose d'un véhicule instrumenté (Renault Clio du LCPC/MI) permettant de mesurer les paramètres de la trajectoire à temps discret. Ce véhicule est équipé d'un dispositif de mesures, appelé MRT (Mesures de Référence des Trajectoires). Ce dispositif de mesures est un système informatique d'acquisition couplé à des capteurs précis (GPS centimétrique et centrale inertielle). Il enregistre à chaque pas de temps les positions, les vitesses, les accélérations et les trois angles d'Euler du véhicule à une fréquence de 100Hz (Ortiz, 2008). En raison de la particularité de ce véhicule lourdement instrumenté, il a été utilisé sur un circuit fermé. Cette piste est constituée d'un virage similaire à ceux que l'on peut rencontrer sur certaines routes nationales (Figure 1).

Figure 1 – Piste du LCPC à Nantes, France

Concernant le choix des conducteurs, ils ont été sélectionnés selon plusieurs critères (tranche d'âge, sexe, nombre d'années du permis de conduire, etc.) dans le but d'avoir un échantillon plus représentatif des conducteurs. Après un repérage en tant que passager du véhicule, chacun des 32 conducteurs a réalisé 10 passages. Afin d'assurer une certaine variabilité des trajectoires, on a donné 2 consignes cibles à respecter (conduite apaisée et conduite rapide). La 1ère consigne est destinée à maximiser le confort des passagers donc des trajectoires se rapprochant de la conduite « sécurisée ». La 2ème consigne avait pour but de minimiser le temps de parcours. Contrairement à la première consigne, cette conduite se situe en état de stress donc génère une situation à risque « danger ». Pour éviter les effets d'accoutumance à une consigne donnée, les consignes sont alternées dans un ordre bien déterminé. L'ensemble des trajectoires collectées est noté ***D***. Après le recueil de données, nous allons définir la trajectoire du véhicule avant la partie analyse des trajectoires.

3. Définition de la trajectoire du véhicule et propriétés

3.1 Approche déterministe de la trajectoire

La trajectoire d'un véhicule pendant un laps de temps T=[0,τ] est la résultante d'une interaction du système V-I-C. Elle est définie par la connaissance de la fonction déterministe suivante :

$$\begin{cases} \Phi & : & T \rightarrow \mathbb{R}^6 \\ t & \mapsto & \Phi(t) = (x_1(t), x_2(t), v_1(t), v_2(t), a_1(t), a_2(t)) \end{cases} \quad (1)$$

De ce fait, on a fait l'hypothèse de ne considérer que les paramètres de la fonction Φ(t) pour décrire la trajectoire du véhicule. Ces paramètres correspondent respectivement : la position longitudinale, la position latérale, la vitesse longitudinale, la vitesse latérale, l'accélération longitudinale et l'accélération latérale. Les paramètres tels que l'angle de roulis ϕ, l'angle de lacet θ et l'angle de tangage ψ se déduisent de façon explicite des paramètres considérés.

3.2 Approche probabiliste de la trajectoire

Ce pendant, le comportement du système dynamique à investiguer est fortement non-linéaire. Il est nécessaire de prendre en compte des incertitudes. Par exemple, un même conducteur circulant avec un même véhicule sur une même route dans les mêmes conditions ne reproduira pas deux fois la même trajectoire au sens de la définition (1). Pour tenir compte de cet aspect aléatoire, une étude (Koita et al, 2009) proposent de considérer les trajectoires résultant du triptyque V-I-C, comme des réalisations d'un processus stochastique vectoriel de la forme suivante :

$$\begin{cases} U & : & \mathbb{R} \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}^6 \\ (t,\omega) & \mapsto & U(t,\omega) = (x_1(t,\omega), x_2(t,\omega), v_1(t,\omega), v_2(t,\omega), a_1(t,\omega), a_2(t,\omega)) \end{cases} \quad (2)$$

Avec Ω l'espace des réalisations. A partir de cette définition, il n'est pas évident à priori que l'on puisse rattacher à un même processus les trajectoires associées à un même couple (conducteur-consigne) compte tenu par exemple de l'effet d'accoutumance. Dés que le conducteur change, les trajectoires recueillies sont des réalisations discrètes de processus différents. Remarquons toutefois qu'il est très difficile (voir impossible) de créer des conditions d'observations expérimentales du même processus. C'est la raison pour laquelle il est judicieux de rechercher des classes de trajectoires similaires sur la totalité du parcours. Une classe sera constituée de Lp réalisations de trajectoires expérimentales issues d'un même processus vectoriel stochastique noté Up. Avec $p \in \mathbb{N}$, est le nombre de classe de trajectoires à identifier. La prochaine étape consiste à répartir l'ensemble des trajectoires de ***D*** en plusieurs classes ayant des propriétés statistiques homogènes.

4. Classification des trajectoires

Dans la littérature, il existe plusieurs méthodes de classification (Duda et al, 2001). Nous avons choisi les nuées dynamiques (Nakache et al, 2005), la méthode Mean shift (Comaniciu et al, 2002) et le Self Organising Maps (Kohonen, 2002) du fait des bons résultats obtenus par rapport aux autres méthodes. L'objectif de la classification est de construire p classes (C_1, C_2,…,Cp) contenant chacune: L_1, L_2,…,Lp éléments (ou objets) de la population ***D***. Les classes notée Cp sont des sous-ensembles disjoints de trajectoires avec $Cp \neq \varnothing$.

L'algorithme consiste à choisir un critère d'affectation d'un objet à un groupe d'objets. Nous choisissons la distance de Mahalanobis pour tenir compte des interactions entre les paramètres de la trajectoire. Ensuite, chaque classe est caractérisée par son centre qui correspond au barycentre ou à la moyenne des éléments qui le composent. Enfin, à chaque itération, l'algorithme minimise la distance intra-classes et maximise la distance inter-classes jusqu'à la convergence. Après plusieurs itérations, nous retrouvons à chaque fois la même répartition de l'ensemble ***D***. Nous concluons que les 4 classes obtenues sont stables $\forall$ le temps t.

Pour donner un sens physique aux classes, la 1ère classe C_1 correspond à la famille des trajectoires les plus rapides avec la conduite apaisée, la 2ème classe C_2 correspond aux trajectoires les lentes avec la consigne rapide. La 3ème classe C_3, correspond aux trajectoires les plus lentes de la consigne apaisée. Enfin, la 4ème classe C_4 correspond aux trajectoires les plus rapides de la conduite rapide.

5. Modélisation stochastique des trajectoires

A chacune des 4 classes précédemment identifiées, on a associé un processus stochastique Up défini de la forme de l'équation (2) sur un espace de probabilité $(\Omega,\Im,P)$. Ce processus décrit le comportement dynamique du système V-I-C. Il est partiellement connu à travers les trajectoires de la classe Cp à laquelle il est associé. Nous rappelons que Up(t) est un processus vectoriel à valeurs dans $\mathbb{R}^6$. Cette famille de processus est difficilement identifiable voire même impossible. Nous proposons de se ramener dans un cadre d'étude beaucoup plus approprié en faisant une projection fonctionnelle.

5.1 Projection du processus vectoriel Up

Considérons le processus Zp = Zp(t) avec $t \in \mathbb{R}$ défini sur $(\Omega,\Im,P)$ tel que :

$$Zp(t) = \mathbf{F}(Up(t)) \qquad (3)$$

où **F** est une fonctionnelle de $\mathbb{R}^6$ à valeurs dans $\mathbb{R}$. Remarquons que **F** est relative aux critères choisis pour définir la défaillance des trajectoires. **F** sera explicitée dans la partie critère de sécurité des trajectoires. En attendant, il est nécessaire d'exhiber quelques propriétés statistiques du processus Zp.

5.2 Représentation standardisée du processus Zp

Le processus Zp est normalisé afin d'avoir peut être la stationnarité à l'ordre 2. Le nouveau processus noté Xp à valeurs dans $\mathbb{R}$ est obtenu par :

$$t \rightarrow Xp(t) = \sigma^{-1}{}_Z(t) \times (Zp(t) - m_Z(t)) \quad (4)$$

Où $m_Z(t) = E[Zp(t)]$ est la moyenne temporelle et $\sigma_{Zp}(t) = E[(Zp(t) - E[Zp(t)])^2]$ est l'écart-type temporel. Pour obtenir des modèles capables de reproduire l'état dynamique du système V-I-C, il faut des réalisations discrètes de Up(t). A partir de ces réalisations discrètes, on caractérise et on identifie les processus Xp. Enfin, par transformation inverse, nous obtenons les modèles du système V-I-C :

$$t \rightarrow Zp(t) = \sigma_Z(t) \times Xp(t) + m_Z(t) \quad (5)$$

Ces modèles théoriques élaborés à partir d'analyse statistique de données sont des modèles stochastiques avec une partie déterministe et une partie aléatoire. La prochaine étape consiste à analyser cette partie aléatoire Xp(t).

5.3 Analyse fiabiliste

Comment déceler, au travers de l'observation des trajectoires pratiquées par une population de conducteurs, des défauts du système de la conduite? Pour répondre à cette question complexe, nous analysons deux modes de défaillance: la sortie de route et la perte de contrôle du véhicule. Ces deux modes se traduisent par trois critères de défaillance: le positionnement latéral sur la voie, la perte d'adhérence (une accélération latérale importante) et l'inconfort du conducteur. Pour chaque critère, on va définir la variable de contrôle et la marge de sécurité associée. Ensuite, on estimera la probabilité qu'un critère ne soit pas respecté ce qui correspond à la probabilité de défaillance P_f de la trajectoire.

Variable de contrôle et critères de sécurité

C'est une variable dont les valeurs qu'elle prend au delà d'un certain seuil admissible caractérise l'état de défaillance du système V-I-C. Soit Yp une variable de contrôle définie sur l'espace de probabilité $(\Omega,\Im,P)$ à valeurs dans $\mathbb{R}$ tel que $Yp = \sup_{t\in T} | Zp(t) |$. On rappelle que $Zp = \mathbf{F}(Up(t))$ avec $\mathbf{F} : \mathbb{R}^6 \rightarrow \mathbb{R}$, une fonctionnelle. Cette écriture permet de transformer la trajectoire en critère de défaillance.

Marge et fonction d'état limite

A chaque critère de sécurité est associé une marge de sécurité qu'on note $Mp = \delta - Yp$, une variable aléatoire définie dans $(\Omega,\Im,P)$ à valeurs dans $\mathbb{R}$.

Estimation de la probabilité de défaillance

Pour le calcul de la probabilité de défaillance P_f, on suppose que Mp admet une densité P_M par rapport à la mesure de lebesgue. Nous estimons P_f à l'aide de la méthode Monte-carlo.

$$P_f\left(M_P < 0\right) = \int_R P_{Mp}(x)dx \quad (6)$$

Par contre pour identifier la loi de probabilité de Mp, on a besoin de simuler Yp, par conséquent le processus Zp. Notons que la simulation de Zp nécessite l'identification de la loi de Xp.

5.4 Identification stochastique du processus Xp

Rappelons qu'à chaque Cp est associée un unique processus normalisé Xp. On va d'abord, vérifier la stationnarité. Ensuite, on cherchera à caractériser et à identifier au mieux Xp(t) à travers des observations expérimentales du processus Up.

Hypothèses de stationnarité et d'ergodicité

Un processus aléatoire est stationnaire par définition, si ses moments de tous ordres sont invariants par translation du temps ($t \rightarrow t + t_0$). La stationnarité joue un rôle important dans la prédiction de séries temporelles, l'intervalle de prédiction étant différent selon que la série est stationnaire ou non. On dit qu'un processus est stationnaire à l'ordre 2 lorsque la moyenne et la variance ne dépendent pas du temps, et que la fonction d'auto-covariance ne dépend que de la différence entre les deux instants (Bouleau, 2002). Par construction ($m_{Xp} = 0$) , ($\sigma_{Xp} = 1$) et puis la figure 2 montre que la fonction d'auto-corrélation R_{Xp} ne dépend pas du temps mais de l'écart (u) entre deux instants donc le processus Xp est stationnaire au second ordre.

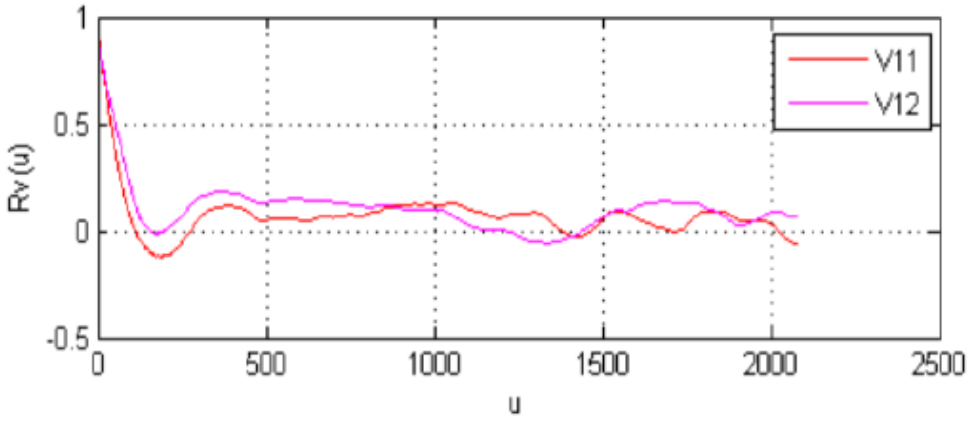


Figure 2 – Fonction d'auto-corrélation des processus Xp

Caractérisation du processus Xp

La caractérisation de Xp (t) consiste à estimer la densité de probabilité (P_{Xp}), la fonction de répartition (R_{Xp}) et la densité spectrale de puissance (S_{Xp}). Ces caractéristiques statistiques seront nécessaires pour pouvoir simuler numériquement Xp(t).

Estimation de la densité de probabilité: une estimation convenable de P_{Xp} peut être la densité relative des points expérimentaux. Plus le nombre d'épreuves est grand, plus les intervalles de partition du domaine des valeurs possibles du processus peuvent être fins et, par conséquent, plus l'histogramme peut donner une meilleure approximation de la densité de probabilité (Bouleau, 2002).

Estimation de la Densité Spectrale de Puissance (DSP): soit le processus stochastique Xp, centré, continu en moyenne quadratique, stationnaire et ergodique. $Lp \in \mathbb{N}$, on note $x^{(l)}$ avec $l \in \{1..Lp\}$, une famille de Lp réalisations indépendantes de Xp(t). Soit $S_{Xp} : R \rightarrow R; \omega \rightarrow S_{Xp}(\omega)$ la DSP de Xp. L'estimateur statistique $\hat{S}_{L,T}$ de Welch a été utilisé pour estimer S_{Xp} avec la fenêtre temporelle W_T de Hamming (Kree, 1984) relative à l'intervalle d'acquisition t = [0, T].

Identification du processus Xp

Une première approximation a été faite par des lois classiques telles que : la loi logistique et la loi normale. Outre la méthode d'approximation par les lois classiques, nous avons développé la densité de probabilité P_{Xp} sur la base des polynômes d'Hermite (Soize, 1993).

5.5 Simulation de processus stochastique scalaire

Simuler un processus Xp consiste à générer numériquement des valeurs Xp (ω, t_1) , …Xp (ω, t_n) selon la loi conjointe donnée par la loi marginale d'ordre n du processus, ceci pour tout n et toute suite $(t)_n$. En général, non réalisable car on n'a pas accès à ce système de lois marginales, sauf pour les processus gaussiens. Xp(t) est non gaussien et connu sur la base d'un nombre très limité de caractéristiques statistiques estimées précédemment: m_{Xp} , P_{Xp} , S_{Xp} , R_{Xp} , etc. La simulation de Xp(t) revient à simuler des processus gaussiens et de trouver deux grandeurs (la fonction **H** et le processus gaussien G(t)) qui vérifient la relation suivante:

$$Xp\ (\omega, t) = \mathbf{H}\ (G(t)) \qquad (7)$$

On se ramène pour cela à un processus gaussien stationnaire normalisé et on construit sa densité spectrale $S_G(\omega)$ à partir des caractéristiques statistiques précédentes. La génération de trajectoires de Xp(t) est alors immédiate dés qu'on a construit les trajectoires du processus gaussien G sous-jacent (Poirion, 2003). La figure 3 représente la comparaison des lois de probabilité du critère « accélération latérale » entre données mesurées et celles simulées.

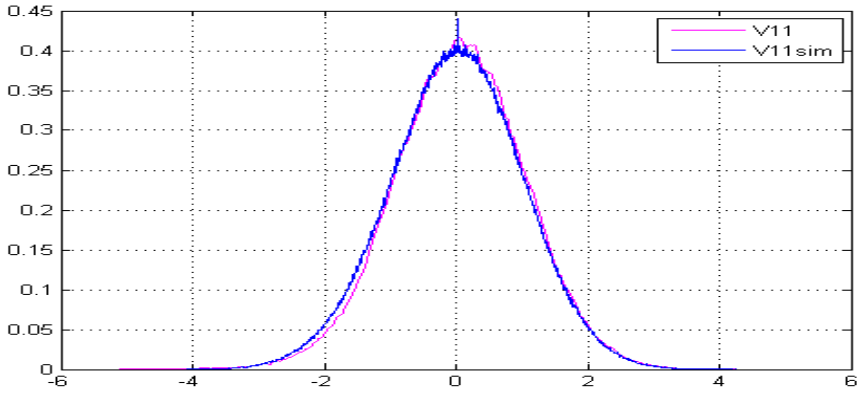


Figure 3 – Comparaison des densités de probabilité « mesures » et « simulations ».

Nous concluons que les modèles du système V-I-C conçus sont validés numériquement. A partir de ce résultat, les processus Xp ont été simulés en quantité suffisante. Ensuite, nous avons obtenu les réalisations du processus Zp et puis celles de la variable aléatoire Mp nécessaires pour estimer la probabilité de défaillance P_f. La figure 4 montre la variation de la probabilité de défaillance en fonction de la variation du seuil de sécurité (δ) pour chaque classe (Cp). On constate une rupture géométrique à ($4m/s^2$) pour la conduite « apaisée » tandis que la rupture géométrique pour la consigne « rapide » se trouve à ($6m/s^2$). Au delà de cette zone, le véhicule est incontrôlable par le conducteur.

Enfin, nous complétons ce travail par le calcul de l'indice de fiabilité conventionnel donné par la relation : $\beta c = -\Phi^{-1}(P_f)$. Un indice important signifie un risque important de défaillance de la trajectoire. Nous constatons un risque élevé pour les classes C_2 et C_4.

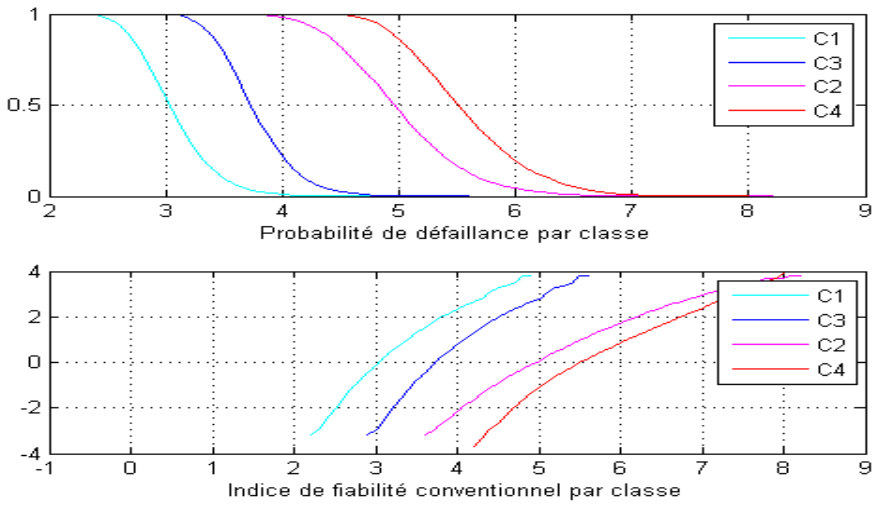


Figure 4 – Comparaison des probabilités de défaillances en fonction du seuil de sécurité

Après avoir estimé la probabilité de défaillance P_f des trajectoires par classe, nous allons maintenant développer un modèle de reconnaissance des trajectoires.

6. Construction du modèle de reconnaissance

Le modèle ***M*** est utilisé pour prédire la classe de chaque trajectoire à l'entrée du virage. Ce modèle de reconnaissance est basé sur les techniques d'apprentissage. L'originalité de cette méthode de reconnaissance réside non seulement sur l'utilisation d'une base d'apprentissage d'observations partielles mais aussi dans l'utilisation des paramètres pertinents de la trajectoire tels que l'équation (2). Dans cette section, on va d'une part, identifier la zone pertinente d'apprentissage et de reconnaissance des trajectoires. D'autre part, on construira un modèle multi-classes en utilisant les algorithmes Support Vector Machine (SVM) sur la zone pertinente choisie.

6.1 Transformation des données

Considérons les observations discrètes issues de la zone d'apprentissage identifiée. L'affectation des trajectoires est vue comme un problème de classification où l'ensemble des données collectées est défini par:

$$S_M = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2) \ldots (x_L, y_L)\} \tag{8}$$

Où $x_v=[x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, x_{i4}, x_{i5}, x_{i6}]^T \in \boldsymbol{D}$ et $y \in \mathbb{R}$ représente les labels des objets x_v. et L représente le nombre de trajectoires observées. On a le vecteur (x_i,y_i) défini par: $x_i = x_v$ et $y_i = \{1, 2,..,p\}$.

6.2 Support Vector Machines (SVM)

La classification (SVM) est une méthode qui fut introduite par V. Vapnik dans son ouvrage (Vapnik, 1995). L'objectif consiste à trouver un hyperplan séparateur optimal dans le cas des classes linéairement séparables. Cet algorithme a été amélioré par Boser en introduisant des noyaux non-linéaires pour étendre les SVM au cas non-linéaire.

6.3 Validation du modèle par rapport à la zone d'apprentissage

D'abord, une zone d'apprentissage correspondant à k = (800 discrétisations) a été choisie. Les résultats du classificateur sont très appréciables avec un taux de reconnaissance de 91.15% en apprentissage et 82% en test. Ensuite, pour étudier la sensibilité du modèle par rapport à la zone

pertinente identifiée, on a choisi une autre zone d'apprentissage avec k = (400) observations. On obtient les résultats suivants avec 86.97% de taux de reconnaissance en apprentissage et 75.52% en test. Le modèle est plus précis pour k = (800) que pour k = (400). En effet, car le virage étudié commence par une ligne droite donc les conducteurs ont tendance à avoir le même comportement. Par conséquent, le modèle a du mal à extraire des critères pertinents. Enfin, en choisissant une zone d'apprentissage de k=1000 discrétisations, le taux de reconnaissance augmente jusqu'à 94.07% en apprentissage et 86.52% en test. L'étude montre un taux de reconnaissance augmentant au fur et à mesure qu'on avance dans le virage. Par contre, plus on avance dans le virage plus le conducteur dispose moins de temps pour corriger sa trajectoire défaillante. Donc pour fixer la zone d'apprentissage optimale, il faut un compromis entre le minimum de discrétisations pour le maximum de taux de reconnaissance. La figure 5 montre la comparaison des performances en fonction du choix de k. Chaque performance a une valeur moyenne et son écart-type.

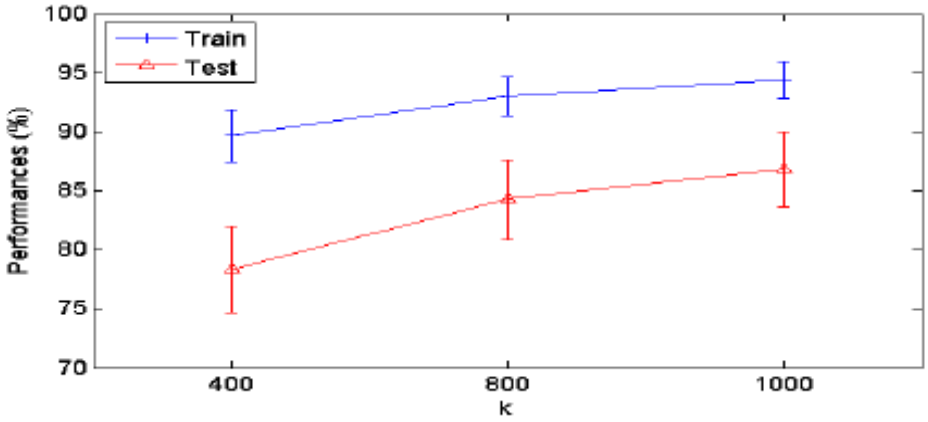


Figure 5 – Performance du modèle en fonction de la zone d'apprentissage.

Nous proposons de fixer k = 800 discrétisations, comme longueur optimale de la zone pertinente pour construire la base d'apprentissage du modèle. Pour conclure, de manière pratique, il est d'abord nécessaire d'observer toutes les familles de comportement de conduite pour une configuration donnée (section 2). Ensuite, chaque famille identifiée doit être aussi représentative que possible (section 4). Enfin, la connaissance de la probabilité de défaillance de chaque classe de trajectoires, couplée au modèle de reconnaissance ***M*** robuste permettra d'éviter les fausses alertes ou la non détection des situations de défaillance.

7. Conclusion

Dans un contexte de développement croissant de stratégies pour améliorer la sécurité routière, l'étude répond à la problématique suivante : proposer une méthodologie d'aide à la détection des trajectoires défaillantes afin de minimiser le risque de sortie de route ou de perte de contrôle.

Après un recueil de trajectoires expérimentales, nous avons utilisé des techniques de clustering dans le but de regrouper les trajectoires recueillies en famille de trajectoires. Les 4 classes identifiées correspondent à des comportements de conduite différents. Les résultats de la classification ont été validés par un critère de convergence. Ensuite, à chaque classe est associé un unique processus Up à valeur dans $\mathbb{R}^6$. Dans le but de se mettre dans un cadre d'étude plus abordable, Up(t) a été transformé par projection fonctionnelle. Le nouveau processus normalisé a vérifié l'hypothèse de stationnarité à l'ordre 2. La loi de probabilité de chaque Xp a été identifiée par une approximation raisonnable. Le développement de la densité de probabilité sur la base des

polynômes d'Hermite est la meilleure méthode par rapport à l'approximation par des lois classiques. La mise en oeuvre de ces modèles a permis de faire des simulations de trajectoires en quantité suffisante de mêmes propriétés statistiques que les trajectoires expérimentales. Ces simulations ont permis d'estimer la probabilité de défaillance des trajectoires et l'indice de fiabilité conventionnel par classe et par critère. Enfin pour compléter la méthodologie, un modèle ***M*** de reconnaissance de trajectoires a été construit en utilisant les techniques d'apprentissage. Ce modèle a permis d'affecter les trajectoires à des classes à l'entrée du virage. La base d'apprentissage correspond à 25% du virage, ce qui laisse 75% du temps au conducteur pour corriger sa trajectoire défaillance prédite. Le modèle présente un pourcentage d'erreur moyen de 10% de mauvaise prédiction.

En perspectives, malgré les résultats appréciables, pour améliorer la précision de la méthodologie, nous proposons d'une part, d'enrichir la base de données expérimentales et d'autre part, d'augmenter les performances du classificateur.

Remerciements

Nous remercions F. Peyret, M. Ortiz et D. Betaille pour le recueil des données de mesures de trajectoires nécessaires pour la construction des modèles.

Références

- Bouleau, N. (2002), « Probabilités de l'ingénieur : Variables aléatoires et simulation », Hermann.
- Comaniciu, D., Meer, P., (2002), "Mean shift : A robust approach toward feature space analysis", IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell, 603-619.
- Duda, R. O., Hart, P. E. et Stork, D. G. (2001), « Pattern classification », J. Wiley.
- Glaser, S. (2004), « Modélisation et contrôle d'un véhicule en trajectoire limite : application au développement d'un système d'aide à la conduite », Thèse.
- Kohonen, T. (2002), "Bibliography on the self-organizing map (SOM) and learning vector quantization(LVQ)", Technical Report TKK-F-A601 1, 545-550.
- Koita, A. et Daucher, D. (2009), "Stochastic analysis of vehicle trajectories in bend : toward a risk indicator construction", International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR), September , Japon.
- Kree, P. et Soize, C. (1984), The Journal of the Acoustical Society of America, Volume 75, Issue 1, January , pp.300
- Lauffenburger, J. Ph., Basset, M., Coffin, F. et Gissinger, G. L. (2003), "Driver-aid system using path-planning for lateral vehicle control", Control Engineering Practice 11/2.
- Nakache, J.P. et Confais, J. (2005), « Approche pragmatique de la classification ».
- Ortiz, M., Peyret, F. (2008), « Mesures de Référence des Trajectoires: description et performances », Rapport technique , Opération MTT, Décembre.
- Poirion, F., Puig, B. et Soize, C. (2003), "Non-gaussian simulation using hermite polynomial expansion", Computational Stochastic Mechanics 1, 487-496.
- Soize, C.,(1993), « Méthodes mathématiques en analyse du signal », Masson.
- Vapnik, V. N. (1990), "Statistical learning theory", J. Wiley.

CAPTEURS POUR UN OBSERVATOIRE DE TRAJECTOIRES

S. AUBIN
CER-ESEO
Angers, France

P. BRIAND
CETE de l'Ouest, LRPC
Les Ponts-de-Cé
France

P. PLAINCHAUT
CER-ESEO
Angers, France

J-M. AUBERLET
LEPSIS,
INRETS-LCPC
Paris, France

T. BOSCH
LOSE/ENSEEI HT-INPT
Toulouse,
France

Résumé

Améliorer la sécurité routière passe par une meilleure compréhension des causes d'accidents. Il est nécessaire de développer des observatoires discrets pour étudier la manière de conduire de tous les automobilistes. Une partie de cette analyse implique l'utilisation de capteurs mesurant les trajectoires des véhicules sur une portion de route. Deux capteurs innovants ont été crées pour pallier au manque de capteurs suffisamment précis : le premier est un capteur à fibres optiques présentant une succession de réseaux de Bragg et le second, protégé par un brevet, est fondé sur une technologie résistive. Des boucles électromagnétiques décalées ont été ajoutées à cet ensemble. Ils ont été soumis à une expérimentation sur une route départementale. Cet article explique les différents capteurs utilisés incluant la prise en compte des contraintes de l'environnement.

Mots-clés: Réseau de Bragg, capteur résistif, capteur à fibres optiques, observatoire de trajectoires, capteur de position, capteur routier, boucles électromagnétiques, position latérale, Systèmes de Transport Intelligents (STI).

Abstract

This action stake is not technology for itself. It is a great help the development of new safety functions, e.g. the estimation of driver's behavior based upon the vehicle's trajectory. This trajectory is determined via two sensors we developed and inductive loop detector. This system must not disturb the driver and should therefore remain invisible to him. The first one is a fiber Bragg grating sensor. It detects local strain due to the vehicle weight. The second one is based upon two conductors. One of them has a grater electrical resistance. The vehicle's weight creates a link between the two conductors. The resulting electrical resistance provides a lateral position estimation of the vehicle. The third one is more reliable. The environment action was included in the development.

Keywords: Bragg grating, resistance sensor, fiber optic sensor, estimation of vehicle trajectories, position sensor, traffic sensor, inductive loop detector, lateral position estimation, Intelligent Transport Systems (ITS).

1. Introduction

Le projet Surveillance Automatisée des Routes pour l'Information des conducteurs et des gestionnaires (SARI) s'inscrit dans le cadre d'une action concertée du Programme de Recherche et Développement pour l'Innovation et la Technologie dans les Transports Terrestres (PREDIT) n°3. Il cherche à réduire le nombre d'accidents en étudiant le conducteur et son environnement afin de l'aider lorsqu'une difficulté est détectée comme peu ou mal perceptible. Il comporte quatre thèmes dont celui intitulé « Visibilité des Zones et Itinéraires à Risques (VIZIR) ». Ces travaux s'inscrit dans le cadre de ce thème qui étudient la modification de la perception du conducteur sur des situations routières interurbaines.

Les accidents sur les routes représentent un des grands fléaux modernes de notre société. Un dispositif ambitieux et innovant a été crée pour suivre la trace d'un véhicule sur une section de route donnée. La trace représente la trajectoire atemporelle du véhicule. Une mesure continue de cette trace en utilisant des capteurs est impossible. Un échantillonnage de la mesure est obligatoire. Par ailleurs, ces capteurs doivent acquérir l'information 24h/24h, par tout temps et de manière discrète pour le conducteur. Les laboratoires et gestionnaires travaillant dans ce domaine recherchent des systèmes analysant la trace avec une erreur de mesure d'un centimètre pour la position longitudinale et latérale, et une vitesse mesurée à 5 km/h (Figure 1).

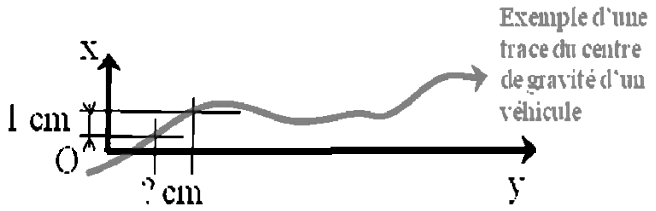


Figure 1 – Représentation d'une trace d'un véhicule

Les capteurs actuels ne permettent pas d'effectuer ces mesures. Ainsi nous avons créé de nouveaux capteurs pouvant être déployés dans un observatoire de trajectoire. En plus du détail de ces capteurs innovants, cet article présente les contraintes et les facteurs influençant ces mesures ainsi que les méthodes utilisées pour les compenser. Un exposé concernant le système à deux boucles électromagnétiques décalées utilisé dans cet observatoire de trajectoires sera dévoilé.

2. Le capteur à réseau de Bragg

2.1 Présentation

Ce capteur est constitué de 4 fibres optiques utilisant des réseaux de Bragg comme transducteur (Hill, 1978). Il a été conçu pour obtenir un capteur équivalent composé d'une fibre optique qui détecte, le long de cette dernière, les déformations à l'aide d'un élément sensible présent tous les 1,5 centimètres. Il se présente sous la forme suivante (Figure 2) :

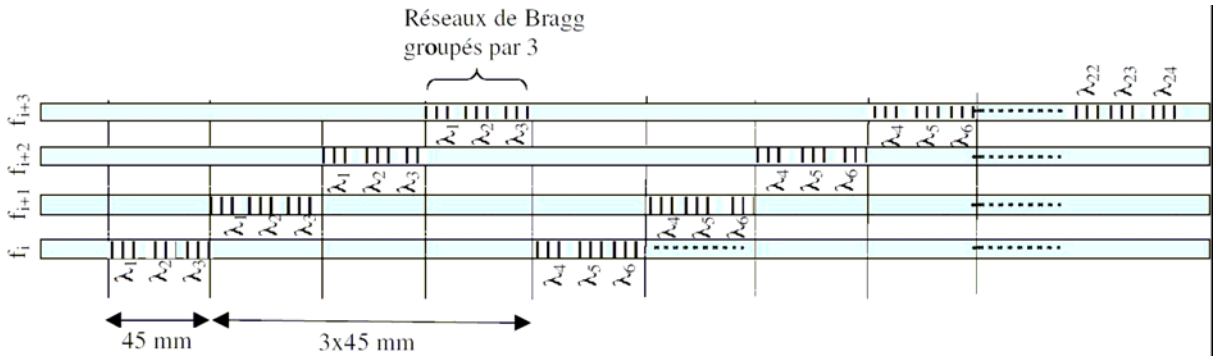


Figure 2 – Constitution du capteur à fibres optiques à réseaux de Bragg

Un réseau de Bragg agit comme un filtre optique pour un spectre étroit (<0,3 nm) et centré sur une longueur d'onde appelée longueur d'onde de Bragg en transmission, c'est-à-dire à la sortie de la fibre, et comme un miroir pour cette même bande de longueur d'onde en réflexion. Lorsqu'une contrainte mécanique transverse est exercée sur la fibre dans une zone où un réseau de Bragg est localisé, la longueur d'onde du filtre augmente proportionnellement à cette contrainte. Le réseau se comporte comme un capteur ponctuel qui, placé dans la chaussée, peut répondre à la pression d'une roue de véhicule passant dessus. En positionnant plusieurs réseaux à des endroits différents, il est possible d'accéder à la lecture d'un champ de contrainte mécanique par simple lecture des variations des différentes longueurs d'onde de Bragg (Aubin, 2006).

Ce capteur est enfoui dans la chaussée de la route. Son conditionnement est réalisé par de la résine. Elle permet d'atténuer les contraintes dues aux passages des véhicules et de la protéger contre des agressions chimiques. Au final, ce capteur optique se présente tel que le montre la figure 3.

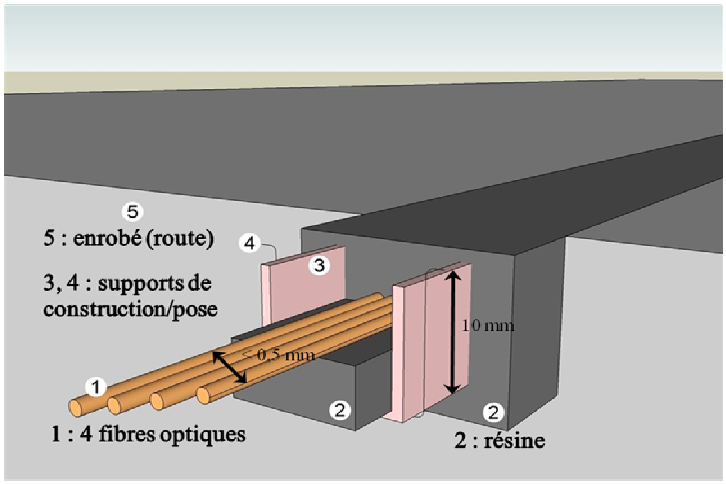


Figure 3 – Schéma général d'implantation des fibres optiques dans l'enrobé

2.2 Grandeurs d'influence

Suivant cette disposition, un réseau de Bragg étiré par le passage d'un camion observe une variation de sa longueur d'onde centrale de Bragg de 1 nm environ. Cette longueur d'onde fluctue aussi avec la température et la pression hydrostatique (Ferdinand, 1999). Le premier paramètre change la longueur d'onde de Bragg de 12,1 pm/°C et le deuxième de -4,5 pm/MPa. Ce dernier est négligeable par rapport à l'influence de la température et de l'étirement de la fibre.

Etant donnée la faible évolution de la température par rapport à l'étirement brutale de la fibre lorsqu'un véhicule sollicite le capteur, la variation due à la température peut être discriminée en repérant régulièrement les nouvelles longueurs d'onde, toutes les heures par exemple.

Les différentes grandeurs d'influence sont donc facilement discriminables. Cependant, lors de la construction de ce capteur, la dilatation de la résine a engendré dans la grille des longueurs d'onde initialement réfléchies des écarts. Au départ, chaque réseau de Bragg à un écart avec son suivant d'environ 1,3 à 1,7 nm (Figure 4, partie gauche). L'écart moyen entre deux réseaux consécutifs est de 1,6 nm avec un écart type inférieur à 0,1 nm. Or, après adjonction de la résine autour des fibres, cet écart varie entre 0,5 nm et 3,5 nm de manière aléatoire. La partie droite de la figure 4 montre ces résultats, soit un écart moyen entre deux réseaux de 1,4 nm et un écart type de 0,4 nm pour la fibre repérée par un symbole en triangle, et un écart moyen de 1,7 nm et un écart type de 0,5 nm pour la fibre repérée par un symbole en étoile.

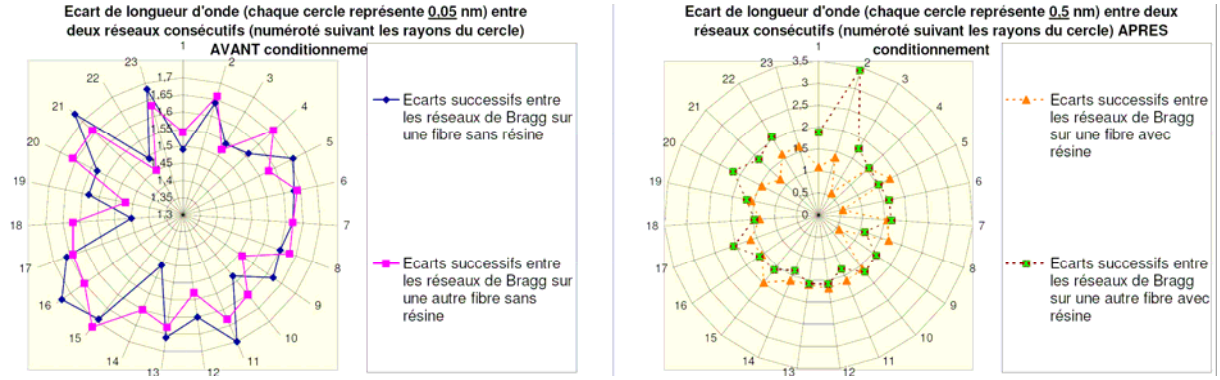


Figure 4 – Influence du conditionnement sur le capteur optique

Après le conditionnement du capteur dans la résine, les écarts révèlent de fortes disparités. D'une manière générale, la résine étire les réseaux de Bragg puisque les longueurs d'onde sont plus importantes après l'insertion de la fibre dans la résine. La formation de la résine s'effectue par mélange de deux produits chimiques liquides, qui, par réaction, se transforment en un matériau solide. Le résultat final dépend des conditions de préparation à savoir un taux d'humidité de l'environnement faible, un mélange régulier à vitesse moyenne, 200 tours par minute, et court, quelques minutes et une bonne ventilation lors du séchage. Lorsque ces conditions ne sont pas correctement respectées comme dans le cas présent, la résine n'a pas une densité homogène. Cependant, dans notre application, un calibrage des longueurs d'onde après avoir noyé les fibres dans la résine permet de palier ce problème.

3. Le capteur résistif

3.1 Présentation

Ce capteur résistif se comporte comme un long potentiomètre. Un véhicule roulant sur celui-ci change la valeur de sa résistance. Cette variation est linéaire par rapport à la position physique de la contrainte. Ce capteur, entièrement conçu à l'ESEO, a été imaginé avec l'objectif de développer un capteur à faible coût. Ce système est protégé par un brevet (Plainchault, 2009).

Il est constitué d'un fil résistif (2 sur la figure 5) placé dans le filetage (1 sur la figure 5) d'une tige filetée (5 sur la figure 5). Le diamètre du fil a été étudié pour s'insérer dans le filetage mais sans jamais dépasser le diamètre de la tige. La tige filetée est entièrement bobinée. Cette tige

vient se loger dans un tube (3 sur la figure 5) dont la paroi interne (4 sur la figure 5) est conductrice de courant. Ce tube a la particularité d'être « souple » et conducteur.

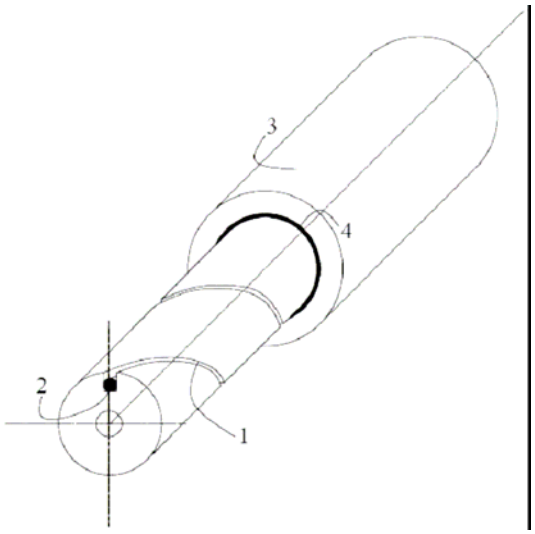


Figure 5 – Schématisation du capteur résistif

Lors du passage d'un véhicule, le tube se déforme comme le présente la figure 6. La paroi interne entre en contact avec le fil résistif logé à l'intérieur du filetage, engendrant un court-circuit d'une partie de la résistance totale.

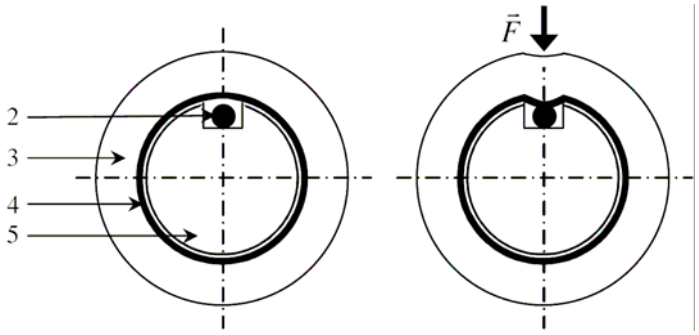


Figure 6 – Coupe de face du capteur avant (figure gauche) et après contrainte (figure droite)

Comme le montre la figure 7, ce capteur est bien linéaire. Des mesures ont été prises à la fois avec un ohmmètre 2 000 points, précision de 0,1 % sur le calibre 2 000 Ω mais aussi avec la carte d'acquisition développée pour mesurer directement la position. Ainsi un modèle simple basé sur la droite de régression linéaire du capteur permet de recueillir la position du point d'appui le plus proche du point 0 du capteur.

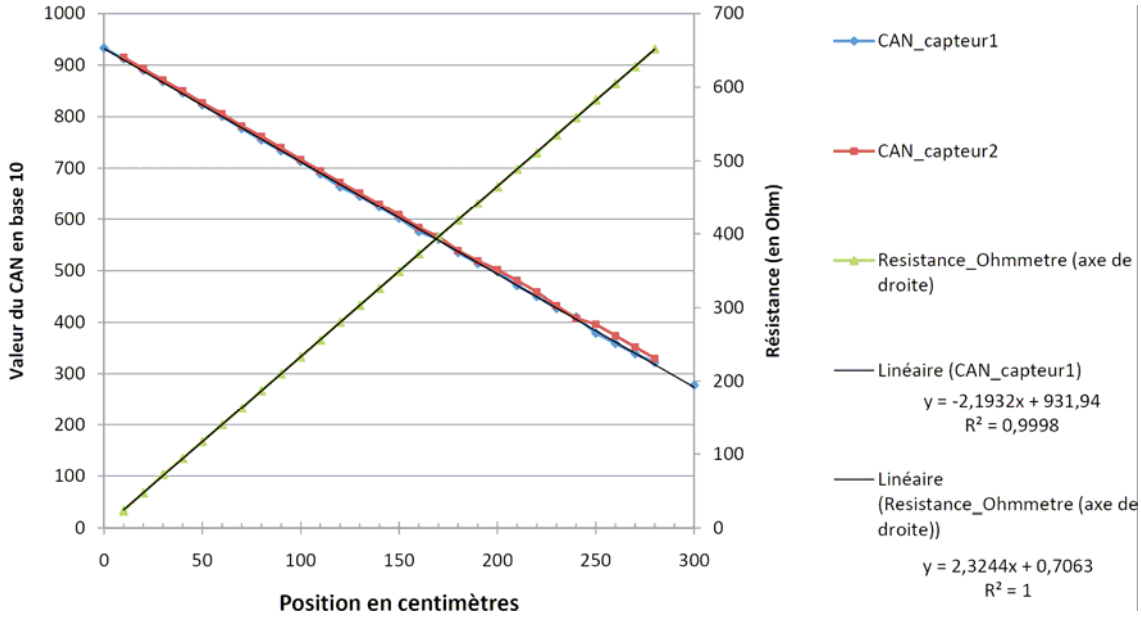


Figure 7 – Etude des mesures en sortie du convertisseur analogique numérique de deux capteurs par des appareils différents (carte électronique, échelle de gauche et ohmmètre, échelle de droite) en fonction de la position du point d'impact sur le capteur.

3.2 Grandeurs d'influence

Ce capteur a été placé dans une étuve pour étudier ses variations par rapport à un changement de température. Plusieurs tests ont été menés dans lequel le capteur a été mis seul dans l'étuve, puis l'électronique d'acquisition et enfin le capteur et l'électronique d'acquisition. La température de l'étuve a évolué entre -15 °C et +80 °C. La profondeur d'enfouissement dans l'enrobé joue sur la sensibilité du capteur. Complètement noyé, il n'est pas suffisamment sensible pour détecter un véhicule. Un travail mécanique est nécessaire pour le rendre plus opérationnel.

Dans l'étuve, la résistivité du capteur est toujours linéaire. Sa résistance linéique croit légèrement avec l'augmentation de la température. Le coefficient d'extension thermique est de 4.10^{-4}. Pour une longueur de capteur de quelques mètres et dans la plage de température donnée, une erreur de mesure de 7 mm est faite. L'électronique seul soumise à la température engendre une variation significative de la résistance. L'erreur de mesure est supérieure à 15 cm. Pour terminer, le système d'acquisition et le capteur ont été placés ensemble dans l'étude. Une erreur de mesure supérieure à 15 cm est également apparue. Pour compenser ces variations, la modélisation de la fonction de transfert résistance - position que nous avons effectuée inclus la variation de la température. Elle est transcrite à travers l'équation suivante :

$$Position[cm] = -0{,}456\ MesureCAN + 0{,}105\ Température_Carte[°C] + 422{,}3 \qquad (1)$$

Cette équation permet de localiser un point d'appui avec une erreur maximale de mesure au centimètre à condition que la température au niveau du capteur soit comprise entre 25 °C ±17,4 °C.

4. Les boucles électromagnétiques

Ces boucles électromagnétiques sont généralement utilisées dans les systèmes de détection de présence de véhicules. Cet équipement est couramment déployé pour mesurer la vitesse des véhicules et/ou faire du comptage pour suivre l'évolution du trafic.

Dans notre cas, les boucles électromagnétiques sont constituées d'un enroulement de 3 spires rectangulaires (2 m x 1.5 m) d'un fil émaillé inséré dans la chaussée à 7 cm de profondeur et disposées comme indiqué sur la figure ci-après, de façon à mesurer le positionnement latéral.

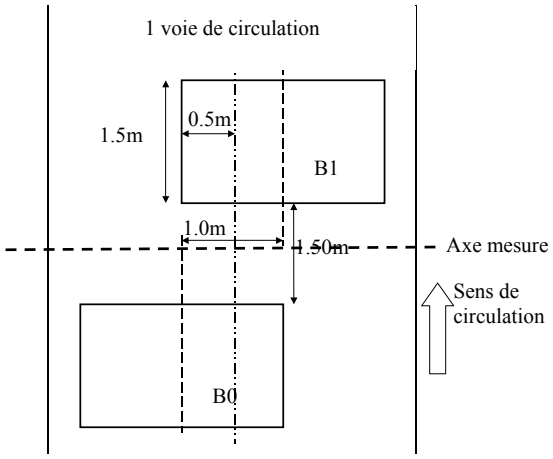


Figure 8 – Schéma d'implantation des boucles inductives pour la mesure de la position latérale et de la vitesse

Cette configuration particulière a été étudiée par le Laboratoire des Ponts et Chaussées d'Angers. Disposées de la sorte, les boucles permettent de mesurer la position latérale des véhicules. Pour la mesure de la position, le principe consiste à mesurer le pic de la variation relative de l'inductance $V = \frac{\Delta L}{L}$ de chaque boucle (B0 et B1) et de comparer ces variations en calculant leur rapport $\frac{V_0}{V_1}$.

5. Résultats

La figure 9 illustre par l'exemple la mesure obtenue par un des capteurs optiques suite au passage du camion de déflextométrie du LCPC. Sur ce passage, deux essieux sont visibles. En raison de la taille du capteur testé (1,5 m), la roue avant droite est visible, premiers pics ainsi que les deux roues droites de l'essieu arrière (sur les quatre présents). Le poids lourd roule dans cet exemple à 90 km/h.

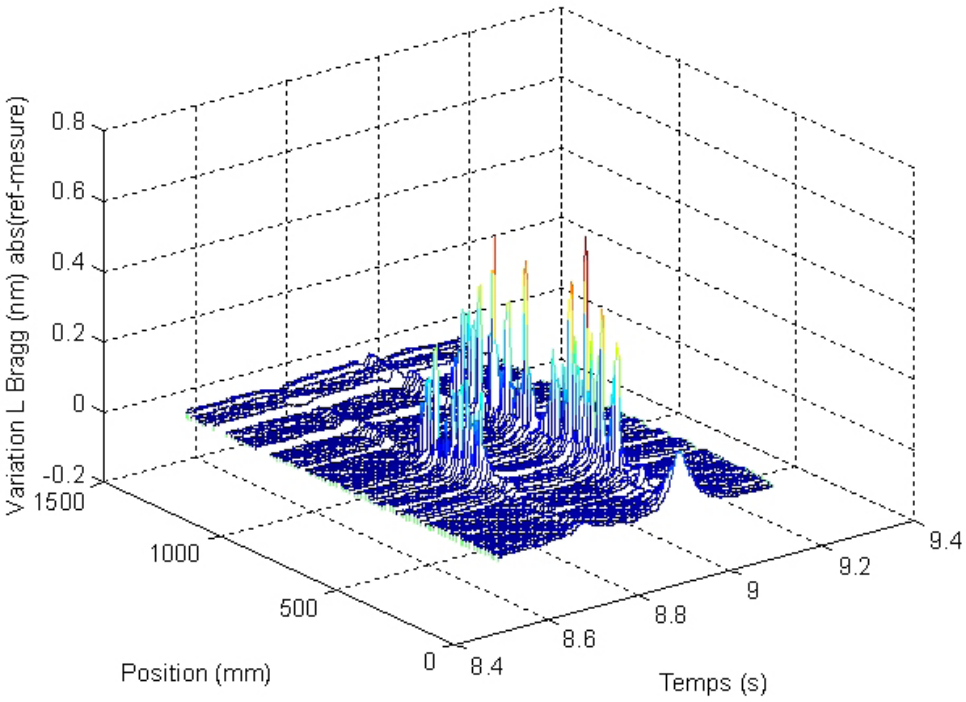


Figure 9 – Variations en valeur absolue des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg, |référence – mesure| sur le capteur à fibre optique n°1 en fonction de la position physique et du temps.

Le tableau 1 ci-dessous présente un bilan des trois capteurs utilisés/mis en œuvre dans cette observatoire de trajectoire.

Tableau 1 – Bilan des 3 capteurs utilisés dans cette observatoire de trajectoire.

Capteur	Capteur à fibres optiques à réseaux de Bragg	Capteur résistif	Boucles électromagnétiques
Erreur sur la mesure de position	5 – 7 cm uniquement sur camion	5cm (1,1cm en laboratoire)	10 cm (2 boucles décalées)
Mesure de la vitesse	Oui (théoriquement possible avec 1 seul capteur)	Oui (avec deux capteurs)	Oui, 5%
Insensibilité météorologique	Oui	Oui	Oui
Coût matériel	+++++	+	+++
Coût d'installation	++	++	+++
Résistance sur le long terme	++ (+++++ possible, mais pas encore testé sur le long terme)	Non significatif, en cours d'amélioration	+++++
Encombrement	+	+	++++
Etat de développement	Prototype	Prototype	Commercial

Ces capteurs ont été utilisés pour obtenir un observatoire des trajectoires sur 800 m (Aubin, 2008). Le site expérimental, la route départementale RD 961, a été proposée par le Conseil Général du Maine-et-Loire en France. Cette section présente une configuration particulière : une ligne droite avec un sommet de côte. Le but de cet observatoire est d'étudier l'évolution de la trajectoire des véhicules lambda sur cette portion de route en fonction de la perte de visibilité et de différents aménagements de l'infrastructure. Les résultats d'impact de l'aménagement sur le conducteur sont disponibles dans (Briand, 2010).

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le Conseil Général du Maine-et-Loire (49) pour leur aide dans la mise en place de ces expérimentations, en particulier A. Stephant et D. Caldironi.

Références

- Aubin, S., Plainchault, P., Bosch, T. (2006), "Fiber bragg grating to observe displacement/positioning", in Proc. 5th Topical Meeting on Optoelectronic distance / Displacement Measurements and applications (ODIMAP) V, Madrid (Spain), 241-246, ISBN: 84-690-0938-9.
- Aubin, S., Ieng, S-S., Plainchault, P., Auberlet, J-M., Bosch, T. (2008), « Capteurs coopératifs pour un observatoire de trajectoire », dans actes de la 5ème conférence internationale francophone d'automatique (CIFA), Bucarest (Roumanie).
- Briand, P., Anceaux, F., Auberlet, J-M., Aubin, S., Pacaux, M-P, Plainchault, P., Rosey, F. (2010), "Impact of perceptual treatments on driver's behaviour: form the driving simulators studies to the field tests - first results", Transportation Research Board of the national academies (TRB).
- Ferdinand, P., (1999), « Capteurs à fibres optiques à réseaux de Bragg », Techniques de l'ingénieur. E 6 735.
- Hill, K. (1978); "Photosensitivity in optical fiber waveguides: from discovery to commercialization", IEEE Journal of Quantum electronics, 6(6), 1186–1189, ISSN: 1077-260X.
- Plainchault, P., Aubin, S. (2009), « Dispositif de détection de la position d'un objet dans une zone et système de détermination de la position d'un objet dans une zone qui utilise un ou plusieurs de tels dispositifs de détection », France, Brevet. FR2922352 (A1).

COMPARAISON STATISTIQUE DE PLUSIEURS SYSTEMES DE MESURE DU POSITIONNEMENT LATERAL DES VEHICULES

Cédric LE BASTARD Patrice BRIAND Philippe LANDAIS
Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Angers,
Les Ponts-de-Cé, France

Bernard JACOB
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées,
Paris, France

Résumé

Une analyse statistique compare des mesures de positions latérales de véhicules réalisées avec différents systèmes développés au sein du réseau scientifique et technique du MEEDDM (RST) : boucles électromagnétiques décalées, mini-capteurs piézo-céramiques, capteurs à ultrasons, barreaux piézoélectriques obliques, un FRAO et un LIDAR. L'étude montre que trois systèmes, FRAO, capteurs ultrasons et LIDAR, estiment sensiblement la même position pour les poids lourds et les voitures. En revanche, les barreaux piézoélectriques obliques et les mini-capteurs piézo-céramiques manquent encore de robustesse, contrairement aux boucles électromagnétiques décalées. Pour les voitures, les boucles décalées donnent sensiblement la même position latérale que le FRAO, le LIDAR et les capteurs à ultrasons. Par contre pour les poids lourds, l'écart statistique entre les boucles et les trois autres systèmes devient assez grand. Par ailleurs, les boucles ne sont fiables que pour des véhicules circulant entièrement dans leur voie de circulation, ce qui n'est pas le cas du LIDAR et du FRAO.

Mots-clés: analyse statistique, position latérale, boucles électromagnétiques, barreaux piézo-électriques, trajectoires, trafic routier.

Abstract

This paper presents a comparative statistical analysis of vehicle lateral positioning measurements performed by various systems developed within the RST: shifted electromagnetic loop, piezo-ceramic mini-sensors system, ultrasonic sensor, piezoelectric bars at an angle, the FRAO and the LIDAR. This study shows that the 3 systems, FRAO, ultrasonic sensor and LIDAR approximately estimate the same positioning for trucks and cars. In contrast, the piezoelectric and piezo-ceramic mini-sensors systems are not robust enough yet. For cars, the shifted loop approximately estimates the same lateral positioning as FRAO, LIDAR and Ultrasonic system. Besides, for trucks, the statistic deviation between the loops and other systems becomes large enough. On the other hand, this system is only accurate for vehicles entirely in their lane, which is not the case of LIDAR and FRAO.

Keywords: statistic analysis, lateral positioning, electromagnetic loop, piezo-electric strip sensors, road traffic.

1. Introduction

Une analyse statistique a permis de comparer les mesures de positionnement latéral de véhicules réalisées avec différents systèmes développés au sein du réseau scientifique et technique du MEEDDM (RST) utilisant respectivement : (1) des boucles électromagnétiques décalées, (2) des mini-capteurs piézo-céramiques, (3) des capteurs à ultrason, (4) des barreaux piézoélectriques obliques, (5) le FRAO, et (6) un LIDAR. Les mesures ont été réalisées en 2005 sur la RN2 par la division Exploitation, Signalisation, Eclairage (ESE, devenue LEPSIS) du LCPC.

La position latérale des véhicules sur la route et dans leur voie de circulation est un paramètre important pour évaluer les comportements, notamment dans les zones à risque telles que les virages ou les sommets de côtes. Associée à la signalisation, la météo, la visibilité, les conditions d'adhérence et de trafic (vitesse, taux d'occupation, interdistance), la position latérale permet d'évaluer le niveau de risque et les probabilités d'incident ou d'accident, par une étude de la fiabilité des trajectoires. Elle permet aussi d'évaluer les impacts des passages de roues sur les marquages, l'orniérage ou le polissage des chaussées. C'est pourquoi plusieurs équipes du RST ont développé des outils de mesures spécifiques à chaque application. Bien que ces systèmes mesurent tous des grandeurs liées à la position latérale du véhicule sur la chaussée, leur inter-comparaison est difficile car ils délivrent des données de nature différente : position du centre de la caisse du véhicule, de la portière avant, ou des empreintes de roues. L'analyse des résultats de cette expérimentation vise donc à relier les informations sur la position latérale donnée par chacun des dispositifs pour un même véhicule et à les comparer. Certains systèmes mesurent en outre d'autres grandeurs : nombre d'essieux ou de roues, silhouette, débit, vitesse, etc.

Nous présenterons d'abord les six systèmes et le site expérimental. Ensuite, une comparaison statistique des données est réalisée en distinguant les véhicules légers et les poids lourds, avec des conclusions.

2. Systèmes de mesure de position transversale

2.1 Système à mini-capteurs piézo-céramiques

Proposé par la division ESE (LEPSIS aujourd'hui) du LCPC, ce système utilise un barreau constitué de mini-barreaux piézo-céramiques de 20 cm de long, placés en quinconce suivant deux lignes perpendiculaires à l'axe de la chaussée (Figure1), et posé dans la chaussée par sciage. L'espacement entre chaque mini-barreau est de 20 cm, et leurs réponses sont indépendantes les unes des autres. La position latérale du centre du véhicule est donnée par la médiane des barreaux excités par les roues droites et gauches. La résolution du système est de 20 cm. La distance estimée est la distance la plus courte entre l'intérieur de la bande d'arrêt d'urgence (BAU) et le milieu de roue. Ce système a été développé pour compter et positionner les passages de roues par rapport à des bandes de marquages, pour leurs essais de certification sur le site de l'ASQUER d'essai des peintures de signalisation routière.

2.2 Système à capteur à ultrasons

Ce système portable proposé par le LROP est purement expérimental. Il est constitué de deux couples de télémètres à ultrasons, suivis chacun par une barrière laser qui mesure la vitesse et pilote les télémètres. Ceux-ci mesurent la distance entre le flanc du véhicule (portière avant droite) et un point de référence (bord de voie). Le principe du système est présenté sur la figure 2. Lorsqu'un véhicule arrive sur la première barrière laser, le premier télémètre à ultrasons émet un signal dont la portée est réglable et programmée ici à 4-5 m. Le temps de parcours de l'onde

sonore émise et réfléchie sur le véhicule est mesuré par un récepteur. Cette première mesure de position latérale combinée à la vitesse du véhicule permet de commander le deuxième capteur à ultrason, qui fournit alors une deuxième position latérale plus précise. Toutefois les mesures dépendent de la température, donc une correction doit être effectuée. Le point de référence a été placé au bord intérieur de la BAU.

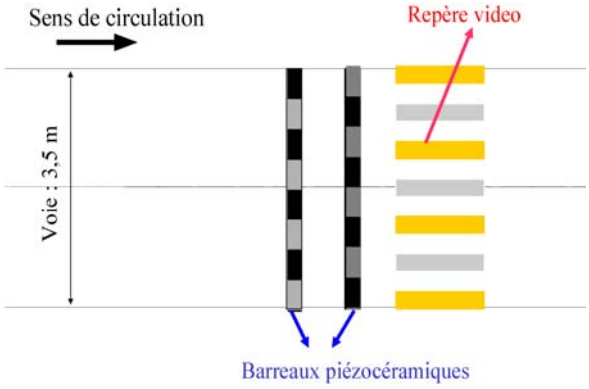


Figure 1 – Principe du système à mini-capteurs piézo-céramiques.

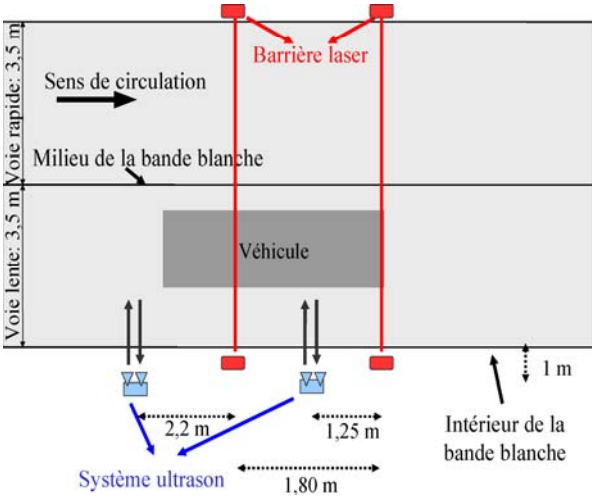


Figure 2 – Principe du système à capteurs à ultrasons.

2.3 Système à barreaux piézoélectriques obliques

Ce dispositif développé par la division métrologie et instrumentation du LCPC (Nguyen Van Phu, 2003), est constitué de 4 barreaux piézo-céramiques posés dans la chaussée. Deux sont placés perpendiculairement au sens de circulation et mesurent la vitesse, les deux autres sont placés à 45° de l'axe de la voie (Figure 3) et mesurent la distance des roues (resp. droite et gauche) par rapport à un point de référence (resp. le bord de voie et le centre de la voie). Les distances mesurées correspondent aux distances entre la roue avant droite (resp. avant gauche) et le bord intérieur de la BAU (resp. la bande de marquage à gauche de la voie). Les instants de passage des roues avant gauche et droite du véhicule sur les barreaux sont enregistrés, d'où est déduite la vitesse du véhicules (barreaux perpendiculaires) puis les positions latérales des roues (barreaux oblique et perpendiculaire).

2.4 FRAO

Ce dispositif portable développé par le CETE de l'Est (Stanczyk et al., 2005) est constitué de 2 capteurs infrarouges associés à un télémètre à ultrasons placé au milieu (Figure 4). Le télémètre mesure la distance entre le flanc droit du véhicule et un point de référence, à partir du temps écoulé entre l'émission du signal ultra sonore et son retour après réflexion sur le véhicule. Les deux faisceaux infrarouges entre cellules émettrice et réceptrice, distants d'un mètre, sont coupés lors du passage d'un mobile et permettent le calcul de sa vitesse, de la longueur du véhicule et d'horodater son passage. La longueur permet de distinguer les poids lourds (PL) des VL.

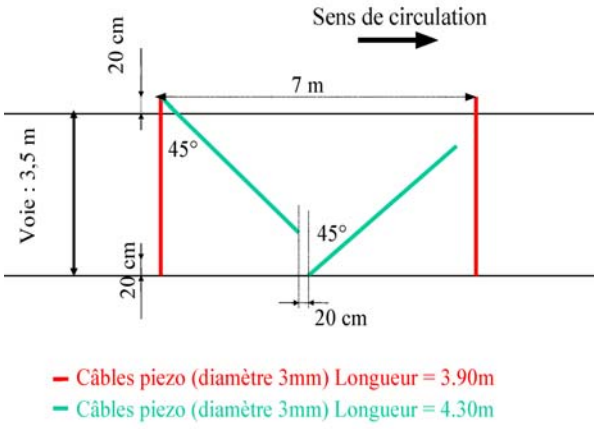


Figure 3 – Système à barreaux piézoélectriques obliques.

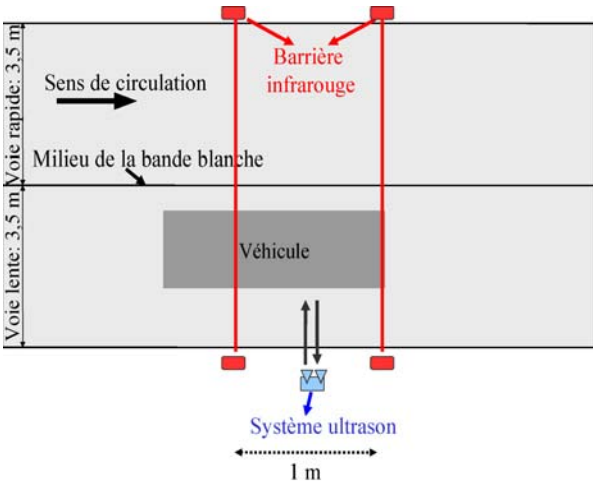


Figure 4 – FRAO (ultrasons et infrarouge**).**

2.5 Système LIDAR

Les systèmes LIDAR (LIght Detection And Ranging) et vidéo sont ici les systèmes de référence. Le LIDAR est un laser à balayage qui calcule pour chaque angle de balayage le temps de parcours de la lumière, et donc la distance (en cm) de l'objet le plus proche. Un LIDAR LMS 220 de chez Sick a été utilisé, et réglé pour que les essieux des véhicules circulant sur la voie lente passent dans le faisceau laser. Il fournit ainsi la distance entre la roue avant droite et le point de référence du LIDAR. En général, la mesure avec des roues de PL est plus facile qu'avec des roues de VL. Le système fournit 15 fois par seconde 101 points de mesure (1 par balayage), répartis entre -50° et +50° par rapport à l'axe du laser, par pas de 1°. L'axe du LIDAR est confondu avec le bord de la boucle située la plus à droite dans la voie lente, et l'origine du LIDAR est située à 4,20 m du bord droit de cette boucle.

2.6 Système à boucles électromagnétiques décalées

Le système, imaginé par le LRPC d'Angers (Briand et al., 2010), utilise une paire de boucles inductives rectangulaires de 2 x 1,5 m (à la norme SIREDO), distantes de 1,5 m et décalées de 1 m transversalement (Figure 5). Cette disposition permet de mesurer, outre les grandeurs habituelles (débit, vitesse, catégorie de véhicule), la position latérale des véhicules par rapport à l'axe de la voie, et plus précisément la distance entre les axes du véhicule et de la chaussée.Le principe de la mesure consiste à utiliser le rapport entre les maximums des signaux délivrés par chacune des boucles décalées (Figure 6), sachant que l'amplitude du signal d'une boucle est maximale lorsque le véhicule passe centré sur elle. Les deux boucles ayant des positions latérales symétriques par rapport à l'axe de la voie, elles donnent des réponses identiques pour les véhicules centrés dans cette voie. Selon que le véhicule est décalé à droite ou à gauche de l'axe de la voie, le rapport des maximums des signaux est supérieur ou inférieur à 1, et la position latérale négative ou positive. La mesure est fiable si le véhicule ne se déporte pas latéralement au passage des boucles et passe bien sur chacune d'elle. La figure 6 donne des résultats (position latérale en fonction du rapport des maximums des signaux) pour trois véhicules légers, et une courbe de régression.

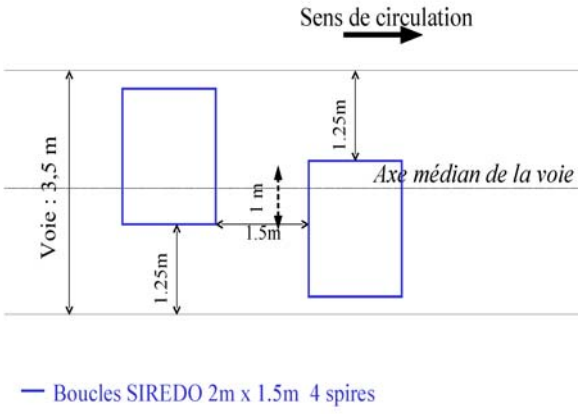


Figure 5 – Principe du système à boucles décalées

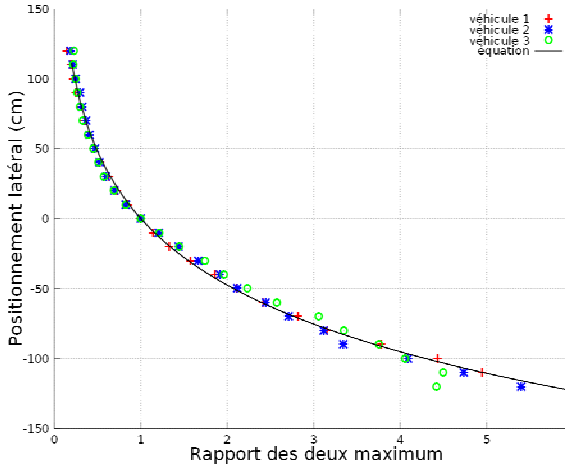


Figure 6 – Rapport des signaux maximaux en fonction de la position latérale

3. Réalisation de l'expérimentation

Les essais ont été réalisés sur la RN2 à Nanteuil le Haudouin, où sont faits les essais de marquages pour l'ASQUER. La route est rectiligne et à 2×2 voies, avec un trafic moyen de 17 000 véhicules/jour dont 15 % de poids lourds. La vitesse est limitée à 90 km/h. Les essais ont eu lieu sur la voie lente. Un système à mini-capteurs piézo-céramiques était déjà en place pour les essais de marquages de l'ASQUER.

Les horloges des systèmes ont été synchronisées au début de l'expérience. Un caméscope a été utilisé pour filmer les véhicules sur la zone de mesure et fournir une référence complémentaire. Des véhicules témoins de largeur connue ont été utilisés en sus de ceux du trafic, pour recaler les horloges et permettre des comparaisons plus fiables entre les systèmes.

Avant de comparer les mesures des six systèmes, une vérification et un nettoyage des fichiers de données a été nécessaire, pour éliminer des véhicules non détectés par certains systèmes ou détectés deux fois par d'autres. Certains poids lourds ont été détectés comme deux véhicules (tracteur ou porteur et remorque) ; en ce cas le « second véhicule » a été retiré. Des véhicules qui se suivent de près ont été identifié comme un seul, et en ce cas le premier a été seul retenu. Il a été vérifié que le même véhicule était bien mesuré par tous les systèmes malgré le décalage temporel entre l'entrée et la sortie de la zone d'essai. Enfin les mesures de véhicules circulant sur la voie rapide ou chevauchant deux voies ont été éliminées. Finalement un échantillon de 232 véhicules dont 142 VL et 90 PL a été retenu pour la comparaison.

4. Analyse comparative des positions latérales

4.1 Cas des véhicules légers

Les six systèmes ne mesurent pas tous les mêmes paramètres, bien que tous soient liés à la position latérale des véhicules. Avant de réaliser la comparaison, la distance entre le flanc droit des véhicules et la limite de la BAU a été calculée ou estimée pour chaque système. Cette grandeur a été retenue comme base de comparaison. Ces calculs ont donc été faits pour les systèmes à barreaux piézoélectriques obliques, à mini-capteurs piézo-céramiques, à boucles électromagnétiques décalées et le LIDAR. La largeur retenue des véhicules légers est 1,55 m (cas

d'une Peugeot 106), donc les mesures du système boucles sont décalées de 0,775 m. Les systèmes à barreaux piézoélectriques obliques et à mini-capteurs piézo-céramiques mesurent la position du milieu des roues, ce qui induit un décalage de l'ordre de 11,5 cm avec les autres systèmes. Le FRAO et les capteurs à ultrasons mesurent directement la grandeur de base. Le LIDAR, qui mesure l'extérieur de la roue, induit un décalage de 3,5 cm.

La méthode statistique de comparaison est celle des essais interlaboratoires présentée dans (Jacob, 1983). Chaque système est considéré comme un « laboratoire ». Les véhicules constituent les « échantillons » mesurés par les divers laboratoires. Des tests de normalité sont d'abord effectués sur l'échantillon des 142 VL : test de χ^2, de Jarque-Bera et Lilliefors avec un risque α de 5 % (Tableau 1). Une fois la normalité acceptée, un test de valeurs aberrantes (test de Grubbs) est mené. Même si l'hypothèse de normalité est rejetée, le test de Grubbs est appliqué, et les éventuelles valeurs aberrantes éliminées, puis la normalité revérifiée.

Tableau 1 - Test de normalité (α = 5 %) sur les données brutes (véhicules légers/poids lourds) ; + normalité acceptée, - normalité rejetée.

Normalité	LIDAR	FRAO	Ultrasons	Boucles	Barreaux	Mini-capteurs
Lilliefors	+/-	+/+	+/+	+/+	-/-	-/-
Jarque-Bera	+/-	+/+	+/-	+/+	-/-	-/-
χ^2	+/+	+/+	+/+	+/+	-/-	-/-

Les mesures des LIDAR, FRAO, capteurs à ultrasons et boucles sont acceptées comme réparties selon des lois Gaussiennes. En revanche, la normalité est rejetée pour les systèmes à barreaux piézoélectriques et à mini-capteurs piézo-céramiques. Les coefficients d'aplatis-sement et d'asymétrie sont respectivement de 7,3 et 1,16 (système à barreaux) et 19,1 et 2,96 (système à mini-capteurs). Aucune valeur aberrante n'a été identifiée pour les quatre premiers systèmes, tandis que 10 et 3 valeurs aberrantes ont été trouvées pour les systèmes à barreaux et à mini-capteurs (à 95 %). Les tests de normalité réalisés après élimination de ces valeurs aberrantes sont à nouveau négatifs, donc les deux systèmes (à barreaux et à mini-capteurs) ont été écartés de l'analyse.

Après élimination des valeurs aberrantes et vérification de la normalité, les moyennes et écarts-types des positions latérales ont été calculés pour les 4 systèmes retenus (Tableau 2). Les tests de comparaison des variances de Cochran et de Bartlett (au risque 5 %) n'ont pas rejeté l'hypothèse de l'égalité des variances pour les 4 systèmes, qui ont donc des dispersions intrinsèques homogènes.

Tableau 2 – Moyennes et écarts-types des positions latérales (VL / PL) après suppression des valeurs aberrantes.

	LIDAR	FRAO	Ultrason	Boucles
Moyenne (cm)	144,8 / 87	123,9 / 73,1	140 / 86,6	155,5 / 80,8
Ecart-type (cm)	22,1 / 20,2	22,4 / 19,9	23,5 / 21,8	20,3 / 17,2

La comparaison des moyennes est réalisée par le test de Welch (au risque 5 %) sur les moyennes extrêmes. Seules les moyennes du LIDAR et des capteurs à ultrasons sont acceptées comme égales au risque de 5%. Le FRAO donne une moyenne inférieure et les boucles électromagnétiques une moyenne supérieure aux deux autres systèmes. La moyenne commune retenue est d'environ 1,4 m (écart entre porte droite et bord de voie). Par conséquent, les VL

roulent un peu décentrés à gauche dans la voie. Les moyennes différentes s'expliquent par des erreurs systématiques qui proviennent du fait que les systèmes ne mesurent pas la même grandeur. De plus, une erreur dans la référence de FRAO peut aussi être la cause de cette erreur systématique.

Enfin les corrélations entre séries de mesures (142 VL) des six systèmes ont été vérifiées. Les coefficients de corrélation sont donnés aux figures 7 et 8. Les systèmes y sont repérés par : LIDAR (1), FRAO (2), LROP (3) pour le système à ultrasons, LRPCA (4) pour les boucles, SMI (5) pour le système à barreaux piézoélectriques obliques, et DESE (6) pour le système à mini-capteurs piézo-céramiques. La figure 7 présente les corrélations avec les données brutes des VL. Le coefficient de corrélation est supérieur à 0,9 entre les quatre premiers systèmes : LIDAR, FRAO, ultrason et boucles, ce qui confirme leur cohérence. Par contre la corrélation est faible avec les systèmes à barreaux piézoélectriques et à mini-capteurs. La présence de valeurs aberrantes et le fait que ces systèmes ne mesurent pas les mêmes grandeurs expliquent cette faible corrélation.

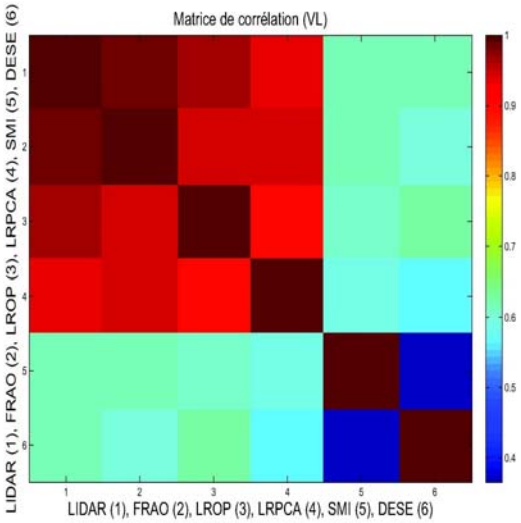


Figure 7 – Matrice de corrélation à partir des données brutes.

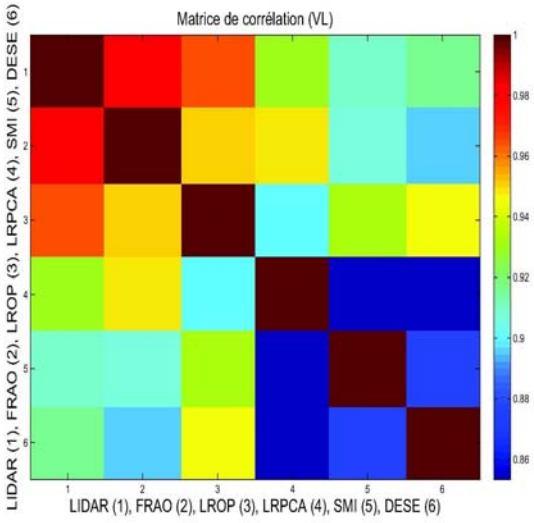


Figure 8 – Matrice de corrélation sans les valeurs aberrantes

La figure 8 présente ces mêmes corrélations après éliminations des valeurs aberrantes, donc pour un échantillon de 129 VL. Les coefficients de corrélation varient alors entre 0,8 et 1 pour les six systèmes. Finalement, l'élimination des valeurs aberrantes augmente la cohérence d'ensemble des six systèmes.

A ce stade, les trois systèmes réellement comparables et qui passent l'inter comparaison sont le LIDAR, le FRAO et le système à ultrasons, basés sur des principes de mesures voisins. Le système à boucles décalées semble pouvoir être retenu aussi pour les VL, moyennant une correction de biais pour tenir compte qu'il mesure une autre grandeur. Par contre les systèmes à barreaux et mini-capteurs piézo-céramiques devront être améliorés pour devenir comparables aux précédents. En particulier, le pas de mesure de 20 cm du système à mini-capteurs est trop grand par rapport à la largeur moyenne (13 % d'incertitude initiale) des VL.

4.2 Cas des poids lourds

Comme pour les VL, l'écart entre le flanc du véhicule et la limite de la BAU a été recalculé à partir des mesures du LIDAR, des boucles décalées, et des systèmes à mini-capteurs et à barreaux obliques piézoélectriques, pour comparer des grandeurs de même nature. Les PL ont une largeur moyenne de 2,45 m, donc les mesures des boucles ont été décalées de 1,225 m. En outre les systèmes à mini-capteurs et barreaux piézoélectriques positionnent le milieu des roues, ce qui induit un décalage d'environ 20 cm par rapport au FRAO et aux capteurs à ultrasons qui positionnent le flanc des véhicules. Le LIDAR lui positionne l'extérieur des roues, avec un décalage de 5 cm par rapport au FRAO.

Le tableau 1 indique que la normalité des mesures n'est pas rejetée pour le FRAO et les boucles décalées. Pour le LIDAR et le système à ultrasons, les trois tests donnent des résultats non identiques. Enfin, la normalité est rejetée par les trois tests pour les systèmes à mini-capteurs et barreaux piézoélectriques, dont les mesures présentent respectivement des coefficients d'aplatissement et d'asymétrie de 10,4 et 1,98, et 13,03 et 3,14 pour chaque système. Le test de Grubbs n'a identifié qu'une valeur aberrante pour le LIDAR et le système à mini-capteurs piézo-céramique, et neuf pour le système à barreaux piézoélectriques obliques. Après élimination de ces valeurs aberrantes, la normalité est acceptée pour toutes les populations et tous les tests, sauf les mesures par ultrasons et le test de Jarque-Bera, et les mesures des systèmes à mini-capteurs et à barreaux piézoélectriques obliques. Ces deux systèmes ont donc été écartés pour la suite de l'analyse.

La comparaison des variances données au tableau 2 a été réalisée par les tests de Cochran et de Bartlett (au risque de 5 %). L'égalité des variances est acceptée, donc la dispersion interne des quatre systèmes est comparable.

Le test de Welch (au risque de 5 %) ne rejette pas l'égalité des moyennes des systèmes LIDAR et à ultrasons, et des systèmes à boucles décalées et à ultrasons. Par contre la moyenne des mesures du FRAO est différente et inférieure. On a constaté que sur ce site, les PL roulent un peu décalés à gauche.

Les coefficients de corrélation entre les 6 systèmes sont visualisés à la figure 9, les valeurs aberrantes ayant été ôtées. Les trois premiers systèmes (LIDAR, FRAO et à ultrasons) sont fortement corrélés. Le système à barreaux piézoélectriques obliques est également bien corrélé avec les systèmes LIDAR, FRAO et à ultrasons. Les systèmes 3 à 6 sont faiblement corrélés, sauf les systèmes à ultrasons et à barreaux piézoélectriques obliques qui ont une corrélation moyenne. Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus pour les VL. A noter que les coefficients de corrélation calculés à partir d'une base de PL ont une plus grande variation que ceux calculés à partir d'une base de VL ; cette différence peut s'expliquer par le fait que ces systèmes ne mesurent pas la même grandeur. La différence entre ces grandeurs (position du centre de la caisse du véhicule, de la portière avant, ou des empreintes de roues) varie certes entre les VL, mais cette différence est davantage marquée pour les PL.
On notera aussi d'après le tableau 2 que la dispersion latérale des PL est sensiblement plus faible que celle des VL.

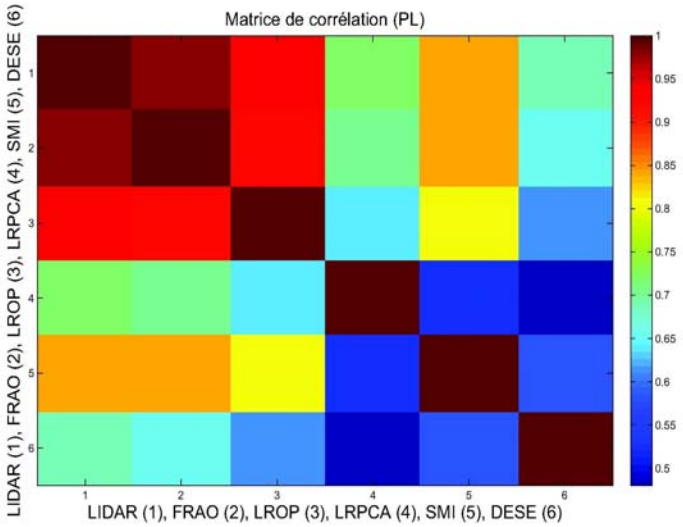


Figure 9 – Matrice de corrélation sans les valeurs aberrantes

Tableau 3 – Synthèse des principes de fonctionnement et des observations pour les systèmes.

	Principe de fonctionnement	observations
LIDAR	• mesure le temps de parcours (la réflexion) du faisceau laser entre le capteur et la cible • calcule la distance entre le bord extérieur de la roue ou de la carrosserie et le système	• système portatif • problème de propagation en cas de pluie
FRAO	• mesure le temps de parcours (la réflexion) de l'onde ultrasonore entre le capteur et la cible • calcule la distance entre le bord extérieur de la roue ou de la carrosserie et le système	• système portatif • vitesse du son dépend de la température (correction de positionnement à effectuer)
Système à capteurs à ultrasons	• mesure le temps de parcours (la réflexion) de l'onde ultrasonore entre le capteur et la cible • calcule la distance entre le bord extérieur de la roue ou de la carrosserie et le système (selon la hauteur du dispositif)	• système portatif • vitesse du son dépend de la température (correction de positionnement à effectuer)
Boucles électromagnéti-ques décalées	• mesure les signatures électromagnétiques d'un véhicule sur les 2 boucles • calcule l'écart du centre du véhicule et celui du centre du dispositif	• système intégré dans la chaussée • l'écart du centre du véhicule et celui du centre du dispositif doit rester inférieur à 1 m
Système à barreaux piézoélectrique s obliques	• les distances mesurées correspondent aux distances entre la roue avant droite (et avant gauche) et l'extrémité du barreau.	• système intégré dans la chaussée • Amélioration à apporter en terme de robustesse
Mini-capteurs piézo-céramiques	• détecte la présence de roue par excitation du (ou des) capteur(s) sollicité(s).	• système intégré dans la chaussée • amélioration à apporter en terme de robustesse • résolution de 1 barreau pour les VL • résolution de 2 barreaux pour les PL

5. Conclusions

L'étude a montré que les trois systèmes, FRAO, à capteurs à ultrasons et LIDAR, estiment sensiblement la même position latérale, tant pour les poids lourds que les voitures. Par contre, les systèmes à mini-capteurs et à barreaux piézoélectriques obliques mesurent des grandeurs un peu différentes et surtout ne donnent pas des mesures distribuées selon la loi gaussienne. Ces deux derniers systèmes devront être améliorés pour devenir comparables aux précédents. En particulier, le pas de mesure de 20 cm du système à mini-capteurs est trop grand par rapport à la largeur moyenne des VL. Le manque de robustesse du système à barreaux piézoélectriques obliques ne doit en aucun cas conduire à écarter ce système dont la géométrie originale a permis d'effectuer des mesures de qualité après élimination des valeurs aberrantes. Les boucles électromagnétiques, elles, donnent des valeurs un peu décalées par rapport aux trois premiers systèmes (FRAO, à capteurs à ultrasons et LIDAR). Les boucles estiment la distance entre les centres du véhicule et du dispositif, ce qui entraîne une imprécision sur le calcul de la position latérale du flanc droit du véhicule. Cette imprécision est provoquée par la dispersion des largeurs des véhicules.

Une synthèse des principes de fonctionnement et des observations est indiquée au tableau 3 .

Remerciements

Les auteurs remercient les personnels de la DESE/LEPSIS pour leurs concours : Delphine Labry pour l'organisation de l'expérimentation, Frédéric Romboni pour la création de la base de données, Michel Bry et Dimitri Daucher pour leurs conseils. Les propriétaires des différents systèmes sont également remerciés pour leur disponibilité.

Références

- Briand, P. et Le Bastard, C. (2010), "Estimation of the Vehicle lateral Positioning from the Inductive Loops", Transport Research Arena Europe, Brussels.
- Jacob, B. (1983), « Recommandations pour la réalisation et l'exploitation des essais interlaboratoires », Bul. liaison Labo P. et Ch., 126, réf. 283.
- Nguyen Van Phu, C (2003), « Mesure de la position transversale des véhicules », Rapport de recherche LCPC.
- Stanczyk, D., Millot, A et Ott, S. (2005), « MTT, RADARR, Mise à niveau du système de mesure FRAO », Rapport CETE de l'Est, livrable n° 0001, Prédit SARI-première tranche.

SESSION 3

Signalisation routière et aides à la conduite

Co-animateurs : Jean-Marc Blosseville (INRETS/LIVIC)
et Denis Gingras (université de Sherbrooke, CA)

DISPOSITIFS DE VISION TOUT TEMPS - AIDE A LA CONDUITE

F. TAILLADE
LCPC
Paris, France

E. BELIN
INRA - UMR PMS
Angers, France

J. DUMOULIN
LCPC
Nantes, France

E. DUMONT
LCPC
Paris, France

F. CHRISTNACHER
ISL
Saint-Louis, France

V. BOUCHER
LRPC
Angers, France

Résumé

La vision à travers les milieux diffusants (brouillard, pluie, fumée, neige, etc.) est un problème important en raison des interactions entre la lumière et les particules qui composent le milieu. Dans ce papier, nous nous intéressons en particulier au cas du brouillard. Nous présentons un modèle analytique pour la détermination de la luminance rétrodiffusée induite par le brouillard. Le modèle repose sur la théorie de Mie et tient compte de la géométrie du dispositif optique. Il permet de prévoir les performances des dispositifs envisagés. Nous présentons deux solutions permettant de voir à travers le brouillard et nous comparons leur performance. La première solution repose sur le crénelage temporel qui permet de trier les photons balistiques parmi les photons diffusés. La seconde repose sur les propriétés spectrales de la rétrodiffusion afin d'éliminer les photons diffusés. Les performances de ces deux techniques sont évaluées par des essais en chambre de brouillard.

Mots-clés: Vision brouillard nocturne, rétrodiffusion, imagerie active, crénelage temporel.

Abstract

Vision through diffuse media (fog, rain, smoke, snow, etc) is a large problem due to interactions between light and particles composing the media. In this paper, one focuses particularly on scattering media as fog. An analytical model for the determination of backscattered luminance induced by fog is described. The model is based on the Mie's theory and takes the optical device geometry into account. It enables to predict the performances of devices considered. We present two solutions enabling to see through fog and we compare their performances. The first is based on range-gated active imaging system enable to perform a temporal selection between backscattering pollution and photons holding optical information. The second is based on the spectral properties of the backscatter to eliminate scattered photons. The performances of these two techniques are evaluated by testing in fog chamber.

Keywords: Foggy Night Vision, Backscattering, Active Imaging, Range Gating

1. Introduction

L'amélioration de la vision en conditions météorologiques dégradées (pluie, brouillard, neige, fumée, etc.) reste un problème difficile à traiter. A notre connaissance, malgré de nombreux travaux menés à la fois par les équipementiers automobiles, aéronautiques et les laboratoires de recherche, il n'existe pas de véritables dispositifs d'aide à la conduite adapté à ces situations accidentogènes.

Jusqu'à présent, les travaux de recherches, menés notamment au LCPC, se sont intéressés à la caractérisation et à la simulation du brouillard (Dumont, 1998), à la détection (Hautière, 2008) ou au développement d'algorithmes de traitement du signal afin de rehausser le contraste (Hautière, 2007) des images lorsque c'est possible.

Nous nous sommes focalisés sur le brouillard de nuit qui nous est apparu comme une des situations les plus extrêmes en termes de perte de visibilité.
Le brouillard a deux effets macroscopiques sur la propagation de la lumière. D'une part, la lumière est atténuée en transmission : c'est l'effet d'extinction. D'autre part, si nous considérons le cas où le brouillard est illuminé, comme par les phares avant d'un véhicule, une partie de la lumière est redirigée vers la direction incidente : c'est l'effet de rétrodiffusion. La combinaison de ces deux effets contribue à réduire le contraste des objets dans la scène de brouillard. Ainsi, pour un capteur, comme l'œil humain ou une caméra, la distinction entre l'information (luminance apparente des objets dans la scène) et le bruit (la luminance rétrodiffusée par le brouillard) devient très difficile. Pour palier ce manque de contraste, il est donc nécessaire d'éliminer la rétrodiffusion de la prise d'image.

2. Etude de la rétrodiffusion de la lumière

Afin de prédire le gain en termes de distance de visibilité des différents systèmes d'imagerie que nous avons imaginés et de comparer leurs performances théoriques, nous avons développé un modèle analytique donnant la quantité de lumière rétrodiffusée et le rapport signal sur bruit en présence de brouillard (Taillade, 2008).

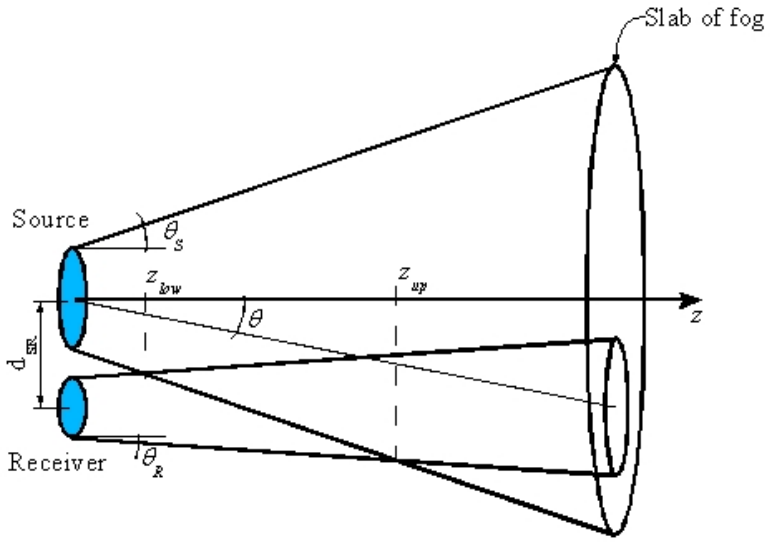


Figure 1 – Schéma d'une source éclairant une tranche de brouillard et d'un récepteur visant une portion de cette tranche

Ce modèle analytique repose sur la théorie de la diffusion de la lumière (Mie) et tient compte évidemment des propriétés du milieu diffusant (granulométrie, indice de réfraction complexe) et des différents paramètres optiques du système imageur (Figure 1) envisagé (source lumineuse : puissance, divergence, longueur d'onde ; récepteur : divergence, position par rapport à la source). La luminance reçue par le détecteur selon les notations définis sur la figure 1, s'écrit :

$$L_B = \int_0^{\infty} \mu_B \frac{P_S}{\pi\left[R_S^2 + z^2 \tan^2(\theta_S)\right]} \frac{p(\pi - \theta(z))}{4\pi} \cos(\theta(z)) \exp(-2\mu_E z) \xi(z) dz \qquad (1)$$

avec P_S, R_S et θ_S respectivement la puissance lumineuse, le rayon et l'ouverture angulaire de la source, θ l'angle entre le centre optique de la zone visée par le détecteur à l'abscisse z considérée et l'axe optique du détecteur, ξ un coefficient donnant la zone de recouvrement entre le faisceau issu de la source et le faisceau prenant appui sur le détecteur enfin μ_B, μ_E et p respectivement les coefficients de rétrodiffusion et d'extinction ainsi que la fonction de phase dépendant du brouillard.

Le rapport signal sur bruit est défini comme étant dix fois le logarithme du rapport entre la luminance du signal et la luminance du bruit. La luminance du signal est la somme des luminances venant de l'objet, de la rétrodiffusion de la lumière par le brouillard et du bruit d'obscurité du détecteur. La luminance du bruit est quant à elle, la somme des luminances venant du fond de la scène, de la rétrodiffusion de la lumière par le brouillard et du bruit d'obscurité du détecteur. Ce rapport signal sur bruit est donné en fonction de la grandeur adimensionnée donnant l'opacité du brouillard. Elle s'exprime par le rapport L/V_m où L et V_m représentent respectivement la distance à laquelle on souhaite voir un objet placé dans la scène et la distance de visibilité météorologique.

Les résultats de ce modèle analytique ont été comparés avec succès à ceux obtenus avec le logiciel de simulation PROF-LCPC (Dumont, 1998), utilisant la méthode de Monte-Carlo. Ils ont également été comparés avec succès à des mesures expérimentales réalisées dans la chambre de brouillard de VALEO (Figure 2). Très récemment, ce modèle a été testé pour simuler des impulsions lumineuses. Il suffit pour cela de considérer la position spatiale de la tranche de lumière dans les bornes d'intégration de l'équation (1).

Nous avons montré et vérifié expérimentalement qu'un conducteur au volant d'un véhicule léger, dans un brouillard de nuit pour lequel la distance de visibilité météorologique est de 100 m, ne voit pas la scène routière au delà d'une distance d'environ 10 à 20 m selon la configuration optique choisie. La granulométrie du brouillard influe peu sur ces résultats.

Pour voir à 100 m dans ces conditions de visibilité, il faudrait un dispositif d'imagerie ayant un gain (en termes de rapport signal sur bruit) d'environ 30 dB ce qui est considérable. La seule solution est donc d'éliminer la lumière rétrodiffusée de la prise d'image. A notre connaissance, il existe principalement deux solutions. La première repose sur la sélection des photons balistiques (et/ou serpentiles), c'est-à-dire les photons qui ne sont pas (ou quasiment pas) diffusés lors d'un trajet entre la source et le récepteur. Elle donne lieu aux techniques de crénelage temporel (Belin, 2008) et de tomographie par cohérence optique (Taillade, 2008). La seconde tire partie des propriétés spectrales du phénomène de rétrodiffusion qui dans certains gammes de longueurs d'onde, peut être éliminé en grande partie.

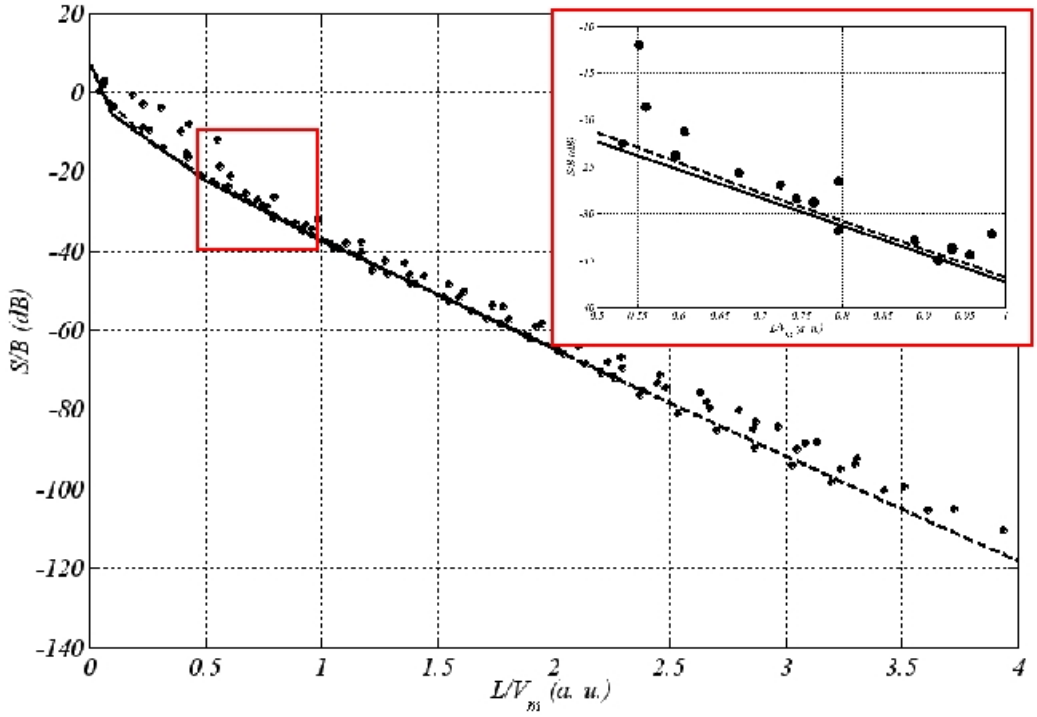


Figure 2 – Comparaison du rapport signal sur bruit en fonction du rapport L/V_m : en trait continu la simulation avec PROF-LCPC, en pointillé le modèle analytique, points les mesures.

3. Le crénelage temporel

Le principe consiste à associer au senseur d'imagerie sa propre source d'éclairage pour illuminer la scène au moment de l'observation. Au lieu d'éclairer la scène de façon continue, on l'éclaire avec de très brèves impulsions lumineuses. La durée d'un de ces flashs de lumière est typiquement de quelques centaines de nanosecondes. Considérant la vitesse de la lumière, une impulsion d'une durée de 100 ns correspond à un train d'onde d'environ 30 m de longueur. Nous avons donc produit une tranche d'espace éclairée, d'une épaisseur de 30 m, qui se dirige vers la scène à visualiser à la vitesse de la lumière.

Cette tranche de lumière atteint un objet présent dans la scène et va, en partie, se réfléchir sur cet objet. La quantité de lumière rétro-réfléchie dépend du coefficient de réflexion de l'objet à la longueur d'onde d'éclairage. Cette portion de lumière rétro-réfléchie revient vers le système d'éclairage. Pendant tout ce temps, l'obturateur de la caméra reste en position fermée. La caméra n'est donc pas éblouie par la lumière rétro-réfléchie par les particules en suspension dans l'air. C'est au moment où l'onde lumineuse revient de la tranche d'espace à visualiser que l'on ouvre l'obturateur de la caméra, ceci pendant une durée équivalente à la durée de l'impulsion lumineuse. On comprend maintenant que la durée de l'impulsion lumineuse et/ou le temps de pose de la caméra déterminent l'épaisseur de la tranche d'espace visualisée au niveau de la scène.

Le délai entre le moment où l'on produit l'impulsion lumineuse et le moment où l'on ouvre l'obturateur de la caméra détermine, quant à lui, la distance à laquelle on regarde les objets dans la scène. La fréquence de répétition des impulsions est d'environ 10 kHz alors que la fréquence image est de 25 images par seconde. Une image est donc la superposition de 400 impulsions ce qui a pour effet d'augmenter le rapport signal sur bruit.

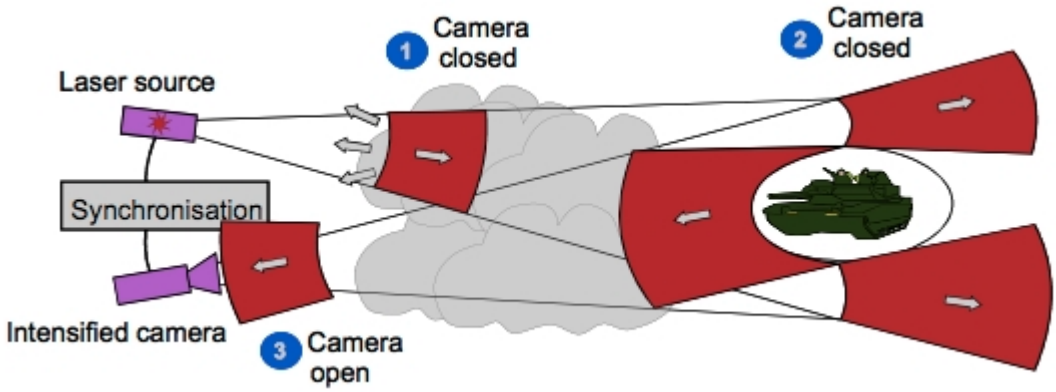


Figure 3 – Schéma de principe du crénelage temporel.

Cette technique d'imagerie active à crénelage temporel est développée pour des besoins militaires par l'ISL (DGA) avec qui nous collaborons depuis 2006. Elle a pu être testée à plusieurs reprises en situation de brouillard nocturne dans les chambres de brouillard du LRPC de Clermont-Ferrand et de VALEO.

La figure 4 montre un exemple d'images acquises avec le dispositif de l'ISL (les 3 images du bas) qui a un champ de vue relativement réduit (3,25°×2,44°). Le panneau est situé à environ 30 m du poste d'observation. Dès que la densité du brouillard est telle que la distance de visibilité météorologique est supérieure à 12 m, le dispositif à crénelage temporel permet d'apercevoir le panneau. Ces essais ont donc montré que cette technique permettait d'augmenter le rapport signal sur bruit d'environ 50 à 60 dB ce qui revient à « voir » environ 15 à 20 fois plus loin qu'à l'œil nu (Belin, 2008).

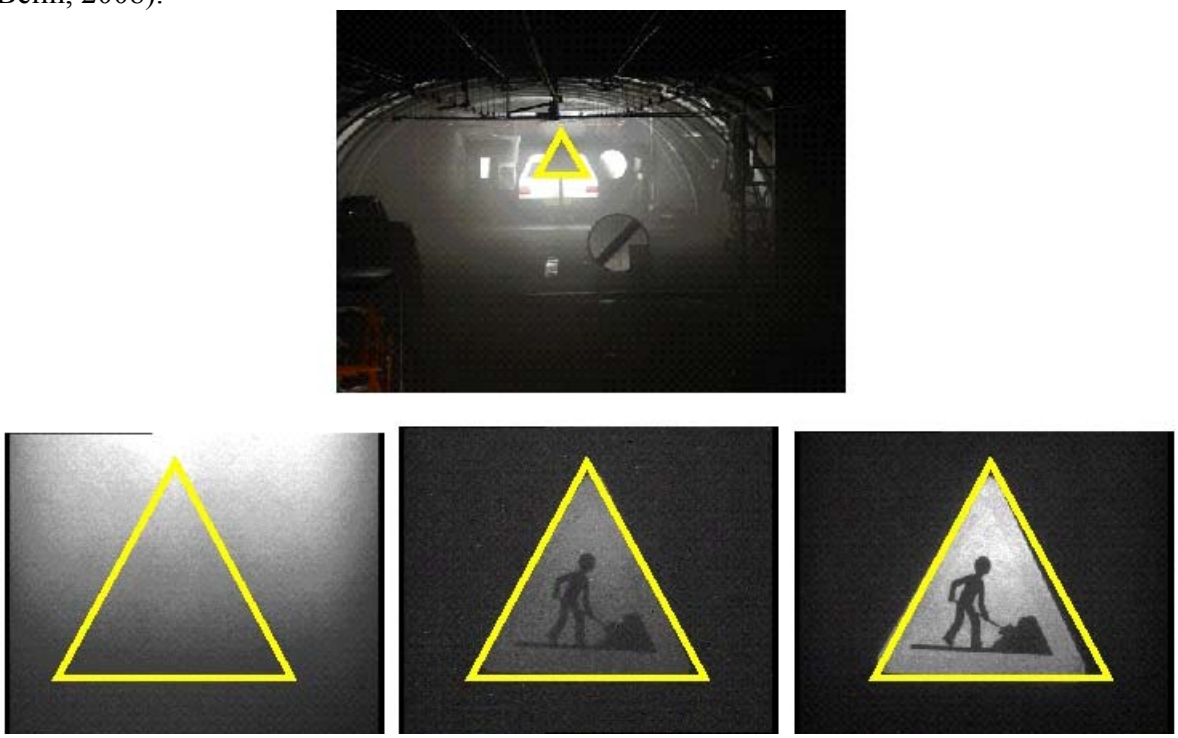


Figure 4 – Résultats de vision active à crénelage temporel à trois distances de visibilité (de gauche à droite 12, 16 et 22 m), image de référence sans brouillard (en haut).

Néanmoins, on se heurte au problème du coût d'un tel dispositif. En effet, la fonction d'obturateur rapide est réalisée au moyen d'un intensificateur d'image piloté en tension. Pour palier ce problème, l'idée est d'utiliser un détecteur matriciel dont on pourrait piloter l'obturateur électronique de manière *ad hoc*. Ceci est technologiquement possible. Un projet est en cours de montage afin de faire une demande de financement.

4. La méthode spectrale

Cette partie ne sera pas détaillée car elle fait l'objet d'un dépôt de brevet en cours de rédaction.

Lors de nos travaux théoriques sur la rétrodiffusion de la lumière, nous avons montré que la rétrodiffusion à certaines longueurs d'onde est très faible si on la compare au domaine spectral visible. Cette solution est techniquement réalisable puisqu'il existe sur le marché à la fois des caméras et des sources fonctionnant dans la gamme spectrale qui nous intéresse.

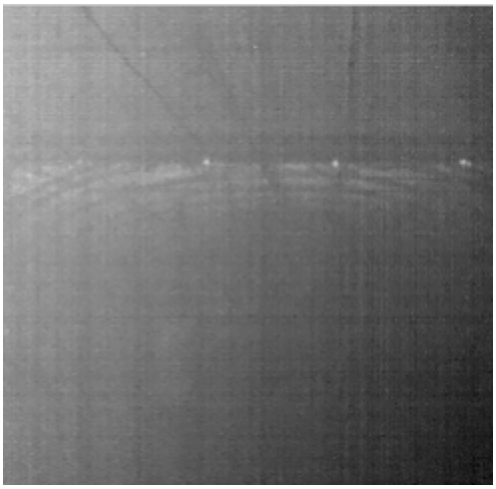
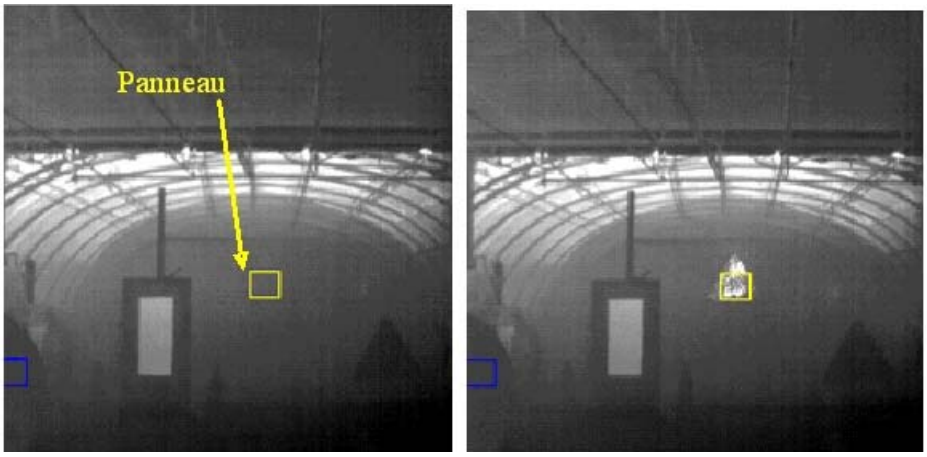


Figure 5 – Exemple d'une image enregistrée dans un brouillard dense (V_m << 8 m) ; la source est située à droite de la caméra.



a) source éteinte b) source allumée

Figure 6 – Exemple d'images enregistrées dans une scène de brouillard avec V_m = 8 m.

Des mesures expérimentales réalisées en chambre de brouillard, au LRPC de Clermont Ferrand, ont permis de confirmer cette étude théorique. Les axes du faisceau de la source et de la caméra étaient colinéaires et très proches en distance l'un de l'autre, de sorte à maximiser la rétrodiffusion

si elle existe. Les premières images ont confirmé nos prédictions théoriques (Figure 5). Même en présence d'un brouillard très dense (V_m << 8 m), la caméra n'est pas éblouie par la rétrodiffusion de la lumière incidente (on ne voit aucune trace du faisceau lumineux de la source).

La figure 6 montre deux exemples d'images prises dans un brouillard dont la distance de visibilité est égale à 8 m. Un panneau routier (cadre jaune) est placé à 25 m du dispositif. Lorsque la source lumineuse est éteinte, seul le contraste « intrinsèque » des objets intervient. Lorsque la source lumineuse est allumée, la luminance mesurée par la caméra au droit du panneau est nettement rehaussée jusqu'à saturer le détecteur montrant ainsi l'efficacité du dispositif.

Bien évidemment, il est nécessaire que les objets visualisés aient un albédo relativement élevé dans la gamme de longueur d'onde à laquelle on se place. C'est en général le cas pour les objets métalliques et les divers dispositifs munis de réflecteurs (panneaux de signalisation, catadioptres de véhicule, etc.).

Pour différentes distances de visibilité météorologiques (mesurées dans le visible), nous avons mesuré le contraste des objets avec notre dispositif. Cette valeur de contraste permet de déduire la distance de visibilité apparente dans la gamme spectrale utilisée (Figure 7). Les objets étaient constitués d'un panneau routier et d'un gilet de sécurité muni de bandes rétro-réfléchissantes.

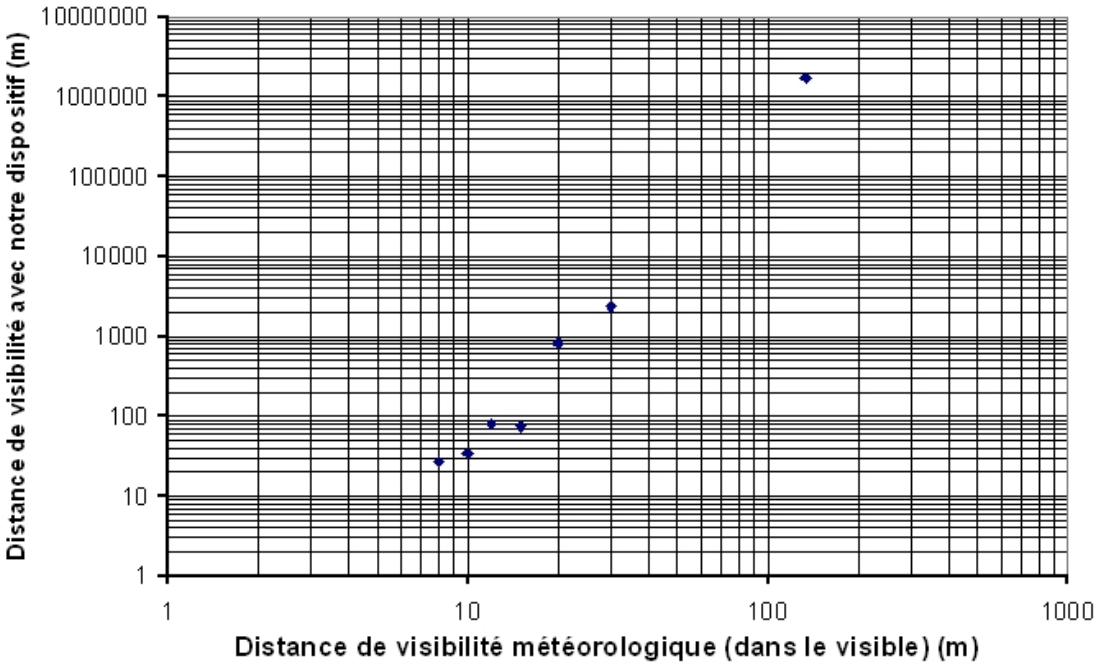


Figure 7 – Variation de la distance de visibilité mesurée avec notre dispositif en fonction de la distance de visibilité mesurée dans le visible.

Pour une distance de visibilité météorologique de 20 m (mesurée dans le visible), le contraste des objets dans le domaine spectral qui nous intéresse est celui que nous aurions eu pour ces objets situés à environ 800 m. Par conséquent, ce dispositif permet d'atteindre un gain d'un facteur 40 sur la distance de visibilité.

5. Conclusion

Dans ce papier, nous avons présenté un modèle analytique de la rétrodiffusion de la lumière. Il permet d'appréhender plus facilement que les simulations reposant sur le lancé de photons (méthode de Monte-Carlo), les facteurs limitant la vision à travers les milieux diffusants. Il permet de prévoir quantitativement la perte de contraste (exprimée en rapport signal sur bruit) en fonction de la densité optique du brouillard. Il est alors possible de prévoir le gain nécessaire des dispositifs à développer afin de voir à travers les milieux diffusants.

Nous avons montré que plusieurs solutions étaient envisageables pour répondre à la problématique. Elles se fondent sur l'élimination des photons diffusés lors de la prise d'image. Deux techniques sont ainsi présentées. Le crénelage temporel permet de trier les photons balistiques parmi les photons diffusés. Cette technique permet de voir 15 à 20 fois plus loin qu'à l'œil nu. Elle est relativement onéreuse mais des solutions bas coût existent et sont en cours de développement. La seconde technique exploite les propriétés spectrales de la rétrodiffusion. Nous avons montré que dans un domaine spectral particulier, il était possible d'éliminer complètement la rétrodiffusion. Cette technique permet de voir 40 fois plus loin qu'à l'œil nu.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier VALEO et le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Clermont-Ferrand pour la mise à disposition de leur salle de brouillard.

Références

- Belin, E., Christnacher, F., Taillade, F. and Laurenzis, M. (2008), "Two full-field imaging systems for vision in fog based on a temporal and spatial selection of ballistic photons", SPIE Optics+Photonics.
- Dumont, E. (1998), "Semi-Monte Carlo light tracing applied to the study of road visibility in fog Monte Carlo and Quasi-Monte Carlo Methods", eds J. Spanier and H. Niederreiter, Berlin: Springer, 177–187.
- Hautière, N., Tarel, JP. and Aubert, D. (2007), "Towards fog-free in-vehicle vision systems through contrast restoration", IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Minneapolis, USA, 19-21.
- Hautière, N., Aubert, D., Dumont, E. and Tarel, JP. (2008), "Experimental validation of dedicated methods to in-vehicle estimation of atmospheric visibility distance", IEEE transactions on Instrumentation and measurement, 10, 57.
- Taillade, F., Belin, E. and Dumont, E. (2008), "An analytical model for backscattered luminance in fog: comparisons with Monte Carlo computations and experimental results", Measurement Science and Technology, 19.
- Taillade, F. et Belin, E. (2008), « Capteur et système d'imagerie pour la détection à distance d'un objet », Brevet n°0858758.

VISIBILITE DE LA SIGNALISATION HORIZONTALE : EVALUATION DE DIFFERENTS NIVEAUX DE PERFORMANCE AVEC UNE METHODE INNOVANTE

Pierre ANELLI
Aximum
Chatou, France

Johann BRUNET

Pierre DA SILVA DIAS
Nexyad
St Germain en Laye, France

Gérard YAHIAOUI

Résumé
Ce papier présente les résultats des travaux effectués sur la visibilité de la signalisation routière horizontale dans le département des Côtes d'Armor (France) dans le cadre de SARI/VIZIR (projet du PREDIT). Sa réponse aux besoins visuels des usagers de la route a fait l'objet d'un état de l'art. Plusieurs niveaux de visibilité ont été évalués sur route ouverte à la circulation publique avant/après modification des marquages routiers selon différentes technologies (matériaux/éléments optiques), selon différentes conditions de vie (de jour/de nuit et par temps sec/ par temps de pluie). La visibilité des marques a été mesurée selon une méthode conventionnelle (photométrie) et selon une méthode innovante (analyse d'image).

Mots-clés: Signalisation horizontale, visibilité, sécurité routière, méthodes de mesure, matériaux, photométrie, analyse d'image.

Abstract
This paper presents the results of the actions done within the SARI/VIZIR (French Research program PREDIT) project concerning the visibility of road markings in the Côtes d'Armor (France). Its answer to drivers' visual needs is reviewed. Several visibility levels have been evaluated on open roads after/before change of road signs according to different technologies (binders, optical elements), under different life conditions (day/night, dry/rain). Road markings visibility has been evaluated with a conventional method (photometry) and with an innovating method (picture analysis).

Keywords: Road Markings, Visibility, Road Safety, Measurement Methods, Materials, Photometry, Picture Analysis.

1. Etat de l'art du rôle de la signalisation routière horizontale

La signalisation routière horizontale constitue une aide à la conduite très importante pour les usagers de la route, en matérialisant les voies de circulation et en indiquant les dangers liés à une perte de visibilité (virages, sommets de côte, ouvrage), à des zones de conflit (intersections, traversées piétonnes) ou à des obstacles (rétrécissements, bordures,…). Elle améliore fortement la trajectoire des véhicules et prévient les sorties de voie, en particulier chez les usagers en ayant le plus besoin (conducteurs novices ou occasionnels, personnes âgées, conducteurs de 2 roues motorisés). Son rôle est particulièrement critique en conditions dégradées, quand les indices visuels de l'environnement de la route s'atténuent (par temps de pluie, de nuit, de nuit par temps de pluie). La visibilité des marquages est une condition préalable à l'efficacité de cette signalisation.

Le projet COST 331 (European Commission 1999) a cherché à mettre au point une méthode scientifique permettant de déterminer la conception optimale de la signalisation horizontale assurant sa visibilité dans la plupart des conditions de conduite. La visibilité de la signalisation routière horizontale permet à l'automobiliste de disposer d'un temps de prévisualisation qui facilite l'anticipation et lui permet de garder la maîtrise de son véhicule sur sa voie de circulation. La lisibilité de la route est assurée par différents indices visuels, et en particulier par la signalisation horizontale. La visibilité de la signalisation horizontale dépend de la géométrie de la marque considérée (forme, surface) et du contraste visuel de cet objet routier par rapport à la couche de roulement de la chaussée (marquages blancs sur route noire). Ces deux paramètres géométrie/contraste visuel doivent être pris en compte pour évaluer la visibilité du marquage pour l'usager, et mettre au point des méthodes alternatives de mesure. Les principales conclusions de l'expérimentation COST fondée sur les besoins visuels des conducteurs sont les suivantes : la visibilité des marques sur chaussées pour les conducteurs dépend de leur luminance (notamment rétroréflexion, en particulier par temps de pluie) et de leur taille (géométrie) ; sur sites routiers d'expérimentation, des marquages plus visibles améliorent la trajectoire des véhicules dans les sections droites et dans les virages (position plus centrale, moins de franchissements) ; sur sites routiers et sur simulateur, des marquages peu visibles (temps de prévisualisation inférieurs à 2 secondes) engendrent une diminution des vitesses, mais l'adaptation est insuffisante par rapport aux besoins de conduite (la vitesse décroît mais devient proportionnellement trop élevée compte tenu de la visibilité disponible) ; sur sites routiers et sur simulateur, l'amélioration de la visibilité des marquages routiers augmente le temps de prévisualisation des conducteurs ; des marquages plus larges et plus visibles n'engendrent pas d'augmentation significative des vitesses, celle-ci étant toujours nettement inférieure à l'augmentation du temps de prévisualisation ; si les vitesses augmentent légèrement, la majeure partie du bénéfice lié à une meilleure visibilité est consacrée à l'amélioration du temps de prévisualisation ; la marge d'erreur des conducteurs concernant le pronostic de l'itinéraire s'accroît du fait d'une meilleure anticipation du tracé et d'une amélioration de la trajectoire. Il faut toutefois noter que, dans l'approche COST, l'apparition d'obstacles imprévus sur la trajectoire n'est pas prise en compte pour apprécier l'effet d'un meilleur guidage visuel sur la sécurité routière.

Davidse et al. (2004) ont effectué une méta-analyse de la littérature portant sur l'effet de la signalisation routière horizontale sur la vitesse des usagers et sur leur position latérale sur la voie de circulation (152 articles identifiés et étudiés au niveau international). Ils ont aussi réalisé une synthèse des connaissances existantes : le marquage longitudinal d'une route permet à l'usager de se positionner sur sa voie de circulation, et de vérifier la position des autres usagers sur la route (trajectoire adjacente en cas de chaussées séparées à voies à même sens de circulation / trajectoire antagoniste en cas de route bidirectionnelle à chaussé unique à voies à sens de circulation opposé

/ trajectoire sécante sur les intersections) ; les marquages longitudinaux délimitent les limites extérieures de la chaussée (lignes de rives) et la répartition des voies de circulation sur celle-ci (lignes axiales) : en conduite normale, les usagers de la route essaient de maintenir leur véhicule sur la voie de circulation ; le concepteur d'une signalisation routière horizontale doit donc arbitrer entre deux risques opposés dans la matérialisation des voies de circulation : une position des usagers trop proche du bord extérieur de la chaussée augmente le risque de sortie de route et d'accident grave (retournement et/ou choc sur des obstacles latéraux dangereux) ; une position des usagers trop proche de l'axe de la chaussée augmente le risque de choc avec des véhicules circulant sur la voie de circulation adjacente (choc frontal sur bidirectionnelle, choc latéral sur voies multiples à même sens). La signalisation horizontale réduit la charge mentale nécessaire à l'usager pour suivre la route, en particulier en conditions de visibilité dégradées, en particulier de nuit. Schagen et Janssen (2000, cités dans Davidse et al., 2004) indiquent qu'elle permet également à l'usager de reconnaître le type de route (longue distance, desserte, accès) sur laquelle il circule, ainsi que leur fonction associée (déplacements à longue distance, desserte locale, accès). Si un meilleur guidage visuel simplifie la tâche de conduite, son effet global sur la sécurité routière (position latérale, vitesse) a fait l'objet de recherches présentant des résultats difficiles à interpréter.

1.1 Signalisation routière horizontale et vitesse des usagers

Davidse et al. (2004) montrent que l'effet de la signalisation routière horizontale sur la vitesse des usagers sur la voie de circulation a été largement étudié dans la recherche consacrée à la sécurité routière (320 cas). La revue de la littérature montre une grande diversité des effets observés sur la vitesse liés à des modifications de la signalisation routière horizontale, avec des changements allant de -10,6 km/h à +10,6 km/h aux extrêmes et 85% des cas compris entre -4 et +3 km/h. Sur la totalité des études, l'effet moyen mesuré est non significatif (-0,08 km/h). L'effet de la signalisation routière horizontale sur la vitesse dépend du type de modification effectué. La création d'une signalisation horizontale linéaire axiale ou en rives) sur une route non marquée auparavant améliore le guidage des usagers et tend à augmenter les vitesses par rapport à la situation de référence. Cet effet subit cependant une forte variabilité en fonction des expérimentations étudiées, la vitesse étant même réduite dans certaines études. Les autres modifications de la signalisation routière horizontale (suppression ou déplacement d'une ou plusieurs lignes existantes, utilisation de plots) n'engendrent pas d'évolution clairement interprétable des vitesses de circulation, avec une dispersion forte des résultats. L'effet d'une modification de la signalisation routière horizontale sur la vitesse des usagers tend à se réduire avec le trafic considéré dans l'expérimentation.

1.2 Signalisation routière horizontale et position latérale des usagers sur la voie

Davidse et al. (2004) montrent que l'effet observé lié à une modification de la signalisation routière horizontale sur la position latérale des véhicules sur la chaussée donne une grande diversité de résultats (369 cas). Les modifications de la signalisation changent la position latérale des usagers jusqu'à des extrêmes de 124cm vers le centre de la chaussée (Pyne et al., 1995) - ce cas extrême correspondant à une étude sur simulateur de conduite, la modification de la signalisation horizontale résultant d'un rétrécissement de la largeur de la surface circulable de la route simulée avant une courbe et donc d'une réduction de la largeur de voies de circulation simulées - et de 80cm vers l'extérieur de la chaussée (Carlsson et Lundkvist, 1992, cités dans Davidse et al., 2004), avec des modifications de 10cm et moins dans 2 cas sur 3. En moyenne, sur l'ensemble des cas étudiés, les changements de la signalisation routière horizontale ne modifient faiblement la position latérale des usagers de la route (déplacement mesuré de 0,5 cm vers le centre de la chaussée). Ils tendent cependant à réduire la dispersion des trajectoires et à augmenter leur prévisibilité. L'effet de la signalisation horizontale sur la position latérale des

usagers doit donc être analysé au regard de la modification effectuée. L'effet d'une modification de la signalisation routière horizontale sur la position latérale des usagers tend à se réduire avec le trafic considéré dans l'expérimentation.

1.3 L'effet de la signalisation routière horizontale sur la sécurité routière

L'association entre les caractéristiques de la signalisation routière horizontale, celles de la route et les comportements attendus de la part des usagers ouvre une perspective sur l'aménagement des routes. Dans Crow (1997), on trouve qu'en modifiant la nature de la signalisation (position, taille et couleur des marques), il est possible d'induire des comportements spécifiques, souhaitables compte tenu des caractéristiques de la voie.

Les marquages routiers aident les conducteurs à maintenir leur véhicule sur la route, à occuper la voie de circulation qui leur est réservée, à anticiper le tracé de la route au loin et à mieux percevoir la zone d'application d'un signal routier. Pour Rumar et Marsh (1998), le marquage routier est particulièrement utile dans des conditions de visibilité dégradées (nuit, pluie, brouillard) quand les autres aspects de l'environnement de la route donnent au conducteur moins d'indices pour exécuter correctement les tâches de suivi de voie et de manœuvre. Agent et Stamatiadis (1996) montrent que selon la littérature américaine, la mise en place d'une signalisation routière horizontale permet des gains importants en termes de sécurité routière. L'utilisation de marquages plus larges et l'implantation de passages piétons ont un effet très fort sur la réduction moyenne des accidents (-48%), même si le nombre d'études consacrées à ces sujets est réduit (2 études à chaque fois). La création d'une ligne axiale de délimitation de voie de circulation en virage permet une réduction moyenne de 36% des accidents de la route sur 19 sites étudiés, avec une variation comprise entre 5% (peu d'effet) et 65%. L'implantation de flèches d'affectation de voie réduit en moyenne de 30% le nombre des accidents de la route sur 6 sites étudiés, cette baisse étant uniforme. La création d'une ligne de délimitation de rive permet une réduction moyenne de 20% des accidents de la route sur 19 sites étudiés, avec une variation comprise entre 2% (non significatif) et 40%. L'efficacité obtenue sur la prévention des sorties de route est en moyenne supérieure à l'efficacité globale. La généralisation de la signalisation routière horizontale sur un itinéraire complet permet une réduction des accidents de 13%. Cette réduction est identique dans les 4 Etats où la mesure a été prise.

Le gain sur le nombre total des accidents de la circulation (tous usagers) est plus faible (10%). L'utilisation de marquages durables constitue une autre voie de progrès : le maintien de la performance des marquages dans le temps (en particulier, la visibilité de nuit mesurée par la rétroréflexion) permet une réduction moyenne de 46% du nombre des accidents de la circulation, à travers 6 études de cas.

Si la signalisation routière horizontale joue un rôle important dans l'amélioration de la sécurité routière, c'est bien parce qu'elle induit un effet favorable sur le comportement des usagers. La visibilité de la signalisation horizontale est au cœur de cette efficacité. Pour cela, il est nécessaire d'appréhender correctement le concept de visibilité de la signalisation routière horizontale.

2. Expérimentations réalisées sur site routier dans les Côtes d'Armor

Le plan d'étude retenu est représentatif de la plupart des situations de vie rencontrées par un conducteur sur une route départementale de rase campagne : relevés de jour, de nuit, par temps sec, par temps de pluie, véhicule seul ou en croisement. Le site routier a été retenu parmi les sites éligibles avec l'appui technique du projet SARI. La signalisation routière horizontale a été

optimisée avec l'aide du maître d'ouvrage pour présenter une visibilité photométrique accrue, en particulier de nuit par temps de pluie.

2.1 Le site d'expérimentation choisi

Le site d'expérimentation VIZIR pour la mesure de l'amélioration des performances de la signalisation routière horizontale, Itinéraire 2 bis, se situe sur la RD 8 sens Guingamp-Bourbriac (intersection RD8/RD63, Bel Air) jusqu'à Kervoaic (Figure 1).

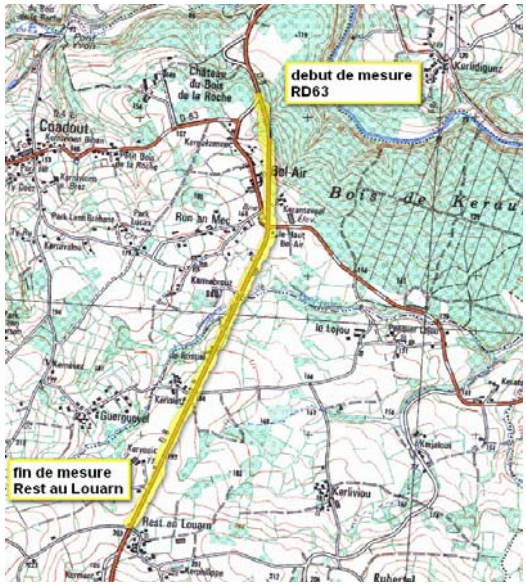


Figure 1 – itinéraire routier analysé et traité (rives/axe)

2.2 Modification des performances des marques dans les Côtes d'Armor

Des matériaux innovants ont été utilisés pour marquer une section de la RD8 entre Bel Air le haut et Kervoaic comprenant une courbe et une ligne droite : peinture en phase aqueuse associée à des matériaux de saupoudrage à hautes performances (sphéricité, transparence, réfraction) un matériau de matrice riche en dioxyde de titane, garantissant une opacité élevée et une blancheur importante, garante d'un excellent contraste visuel (visibilité de jour). Les lignes de rives ont été réalisées avec des procédés à haute visibilité de nuit par sec temps, la ligne axiale Visible de Nuit par Temps de Pluie VNTP (Figure 2).

Figure 2 – marquages rénovés (rives /axe VNTP)

2.3 Acquisitions vidéographiques et photométriques dans les Côtes d'Armor

La section expérimentale retenue est relativement rectiligne, ce qui facilite les acquisitions réalisées par des instruments de mesure montés sur des véhicules, qu'il s'agisse de la tête de mesure Ecodyn® pour le véhicule mlpc ou de la caméra vidéo pour VisiNex™ Route. Les relevés Ecodyn® et les relevés vidéo VisiNex™ ont été analysés avant et après optimisation du marquage routier dans les différentes situations de conduite. Les relevés vidéo ont été réalisés

avec un véhicule de tourisme « moyen » équipé d'un caméscope numérique du commerce situé au centre du pare-brise, à une hauteur correspondant à la vision d'un conducteur normal. Les conditions atmosphériques (éclairage / pluviométrie) sont celles du moment de l'acquisition. Le caméscope a été préalablement étalonné avec une mire sur banc de laboratoire VisiNex™.

2.4 Description des méthodes par analyse d'image et par mesure photométrique

Ecodyn

La méthode normalisée pour mesurer la visibilité des marquages routiers est un appareil à grand rendement (type Ecodyn®) qui mesure en continu et en un seul passage la visibilité de nuit (rétroréflexion) par temps sec des marquages routiers pour les usagers de la route. Un réflectomètre monté sur véhicule émet une lumière elliptique sur la bande de marquage et sur la chaussée environnante et mesure la lumière rétroréfléchie (Figure 3). Cette mesure traduit la brillance d'un marquage routier telle qu'elle est perçue par les conducteurs de véhicules légers circulant de nuit par temps sec sous l'éclairage de leurs propres projecteurs (niveau d'éclairage normalisé). Cette méthode à pour inconvénient de ne pas prendre en compte les conditions particulières comme la pluie, ou d'autres configurations d'éclairage (ex : camion, led), cf. § 2.6. C'est pour cela que nous avons travaillé avec une méthode innovante.

Figure 3 – Méthode ECODYN®

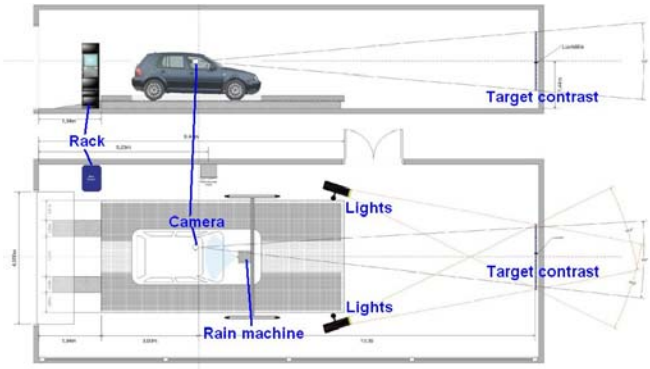


Figure 4 – Méthode VisiNex™

VisiNex™

La version laboratoire de l'outil VisiNex™ (Figure 4) est un système de vision artificielle qui acquiert des images calibrées (mire) au travers d'un pare-brise (le système est focalisé sur la mire) et exécute un modèle de vision humaine. Ce modèle conduit à la détermination de descripteurs tels que : distance maximum de détection d'un objet (marquage, piéton, voiture...), distance maximum de reconnaissance, taille minimum d'un objet qui peut être reconnu à une distance donnée (et pour une vitesse donnée de la voiture à un instant donné), score de qualité visuelle (ou VQS, Visual Quality Score). Le VQS est par construction corrélé à l'impression de la bonne qualité d'une image (la bonne qualité veut dire la facilité à interpréter la scène). VisiNex™ exploite plus de cinquante ans de résultats de recherches en furtivité militaire Johnson, J. (1958), Yahiaoui, G. et Da Silva Dias, P. (2003), Harney et Robert (2005). Dans ce projet, nous utilisons une version évoluée de VisiNex™. Cette évolution peut être embarquée dans un véhicule porteur et n'emploie pas de mires calibrées.

2.5 Visibilité des marquages mesurée par VisiNex™

Des acquisitions vidéographiques de l'itinéraire de référence mettent en évidence l'amélioration du guidage visuel obtenue par l'amélioration de la visibilité des marquages, en particulier de nuit et en conditions sévères (de nuit par temps de pluie).

La visibilité nocturne mesurée des marquages routiers a été comparée entre deux méthodes de mesure : la méthode normalisée (visibilité photométrique des matériaux Ecodyn®) et notre méthode alternative fondée sur l'analyse de l'image des films de la route (VisiNex™). Le jeu du film dans le lecteur VisiNex™ permet en temps réel de visualiser l'état du marquage et sa qualité visuelle calculée par l'outil le long de l'itinéraire.

Les images lors des différentes acquisitions ont été recalées par positionnement GPS à l'aide de l'outil RT Maps. Les mesures issues du traitement logiciel VisiNex™ donnent en tout point de l'itinéraire la visibilité de l'objet dans la zone d'intérêt considérée de l'image. Les mesures VQS brutes sont représentées ci-dessous (Figure 5).

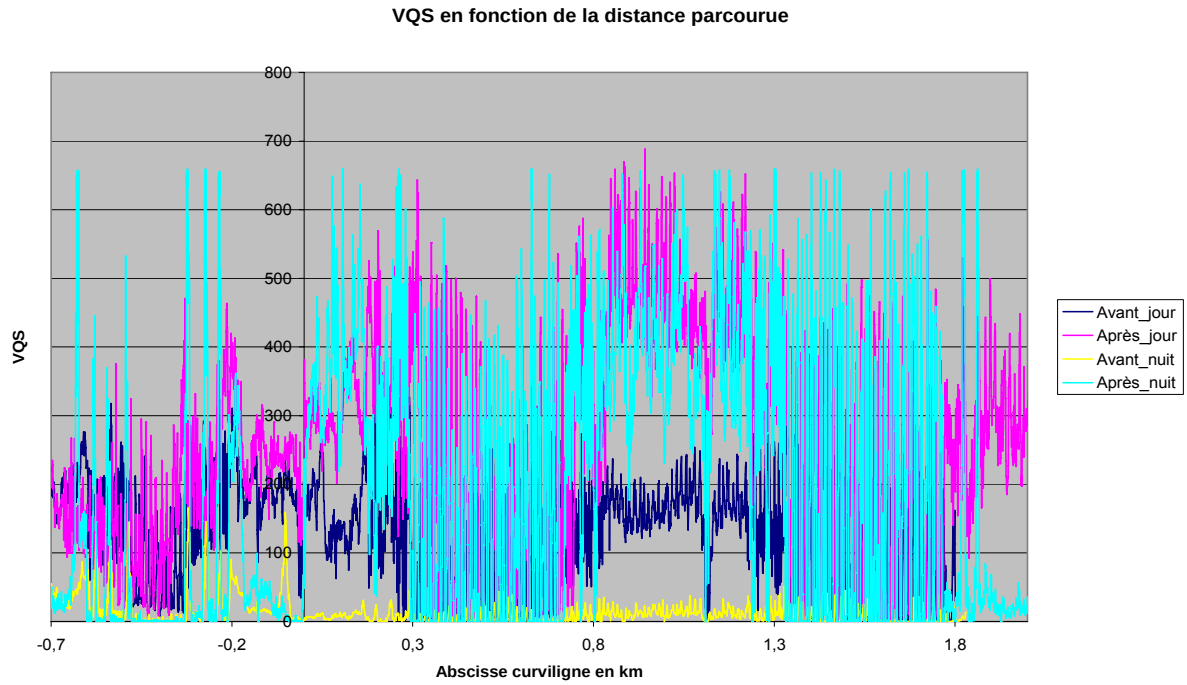


Figure 5 – Mesures VQS jour/nuit avant/après selon VisiNex™

On obtient un VQS globalement plus élevé après réfection des marquages (courbes magenta et bleu ciel à partir de 0 km). La visibilité de jour de la signalisation routière horizontale augmente fortement avec la réfection du marquage routier (VQS passant de 150 à 450). De nuit, l'amélioration de la visibilité est maximale : le marquage usé était quasiment invisible et devient aussi visible de nuit que de jour après traitement. De nuit, le VQS du marquage est égal à environ 30 avant, et passe à une valeur d'environ 450 après.

Les images relevées lors des acquisitions de jour et de nuit avant et après réfection du marquage montrent bien, dans certaines conditions, la différence de visibilité perçue des marquages routiers (Figures 6 et 7).

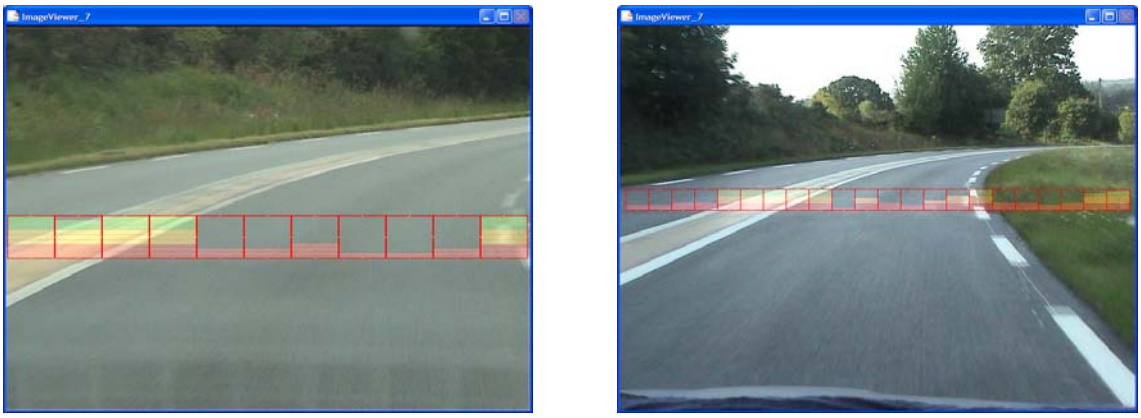


Figure 6 – Vidéos de jour avant/après selon VisiNex™

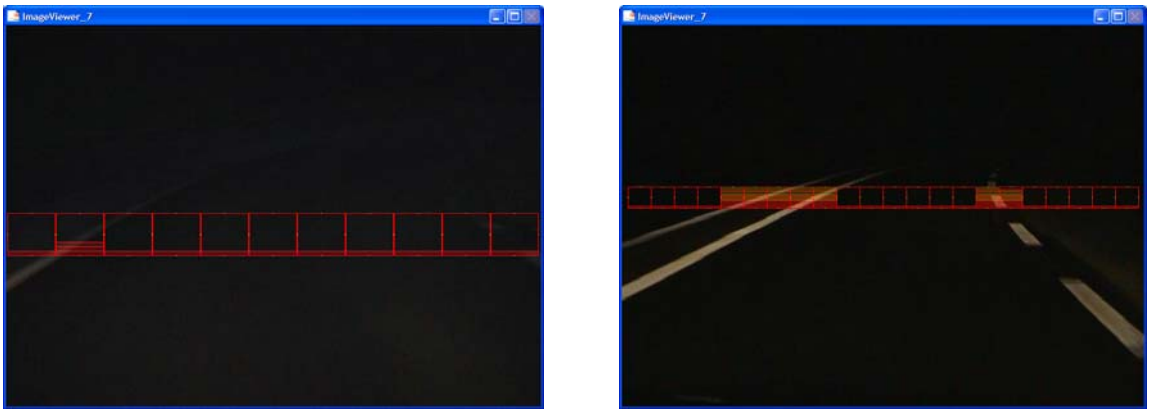


Figure 7 – Vidéos de nuit avant/après selon VisiNex™

2.6 Comparaison des visibilités mesurée par VisiNex™ et Ecodyn®

Les valeurs de la figure 8 montrent les valeurs mesurées respectivement par Visinex™ et par Ecodyn®. Avec les deux indicateurs (VQS et R_L), on mesure bien l'apport de la réfection des marquages. On peut aussi noter les différences de valeurs mesurées sur la section du PRK 1+3 au 1+8 où le VQS reste très liée à la différence de concept entre la mesure VisiNex™ et Ecodyn. Le VQS mesuré sur cette section est plus faible car on est en présence d'une ligne de guidage axial discontinue de type T1 (marques de 3m, espacées d'un vide de 10m). La valeur mesurée pour la rétroréflexion des marquages (RL) reste quant à elle élevé, car cette mesure ne prend en compte que les zones marquées (traits pleins) et non les espaces de chaussée entre les marques (vides).

Les mesures VisiNex™ calculent la visibilité pour le conducteur d'un véhicule des marquages routiers filmés dans ses conditions de vie (jour/nuit, type de véhicule y compris feux d'éclairage et système d'essuyage, route sèche/mouillée, pluie éventuelle) au moment de l'acquisition. On peut donc mesurer la visibilité dans différentes conditions, ex : par temps de pluie, soleil rasant, etc. Les mesures Ecodyn sont une mesure de la réflectométrie des marquages dans des conditions nuit temps sec, qui ne prennent pas en compte des conditions environnementales particulières (visibilité de jour, route mouillée, nuit par temps de pluie). Elles ont donc à la fois l'avantage d'être indépendantes des conditions d'acquisition et l'inconvénient de ne pas pouvoir les restituer lors des acquisitions standards.

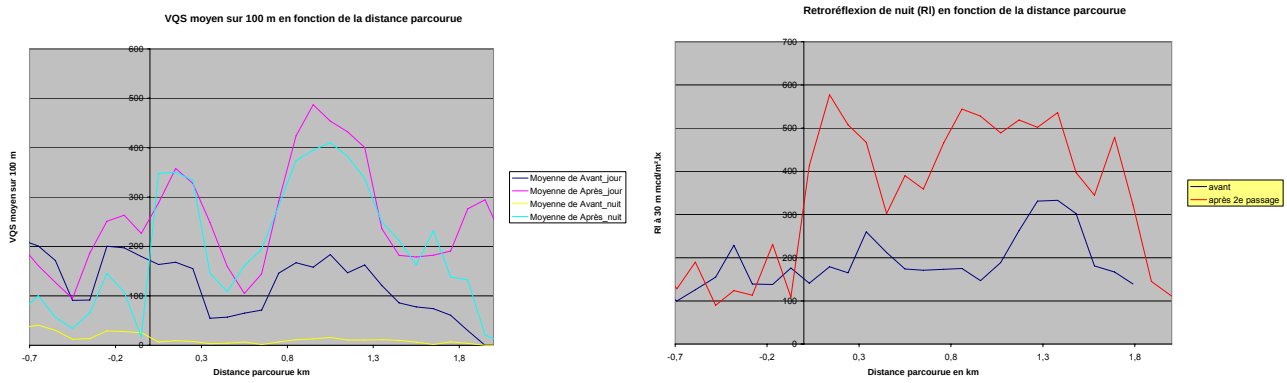


Figure 8 – Comparaison mesures VQS selon VisiNex™ et mesures Ecodyn®

3. Voies de recherche

L'intérêt de l'outil réside dans la prise en compte de l'ensemble des objets routiers dans leur globalité. Il restitue la notion de marquage en tant qu'équipement constitué d'un ensemble de marques, et non la notion de marques sur chaussée en tant qu'objets individuels.

La mesure de l'Ecodyn se concentre sur la photométrie de chacune des marques sur chaussées en tant qu'objets individuels, en faisant abstraction des vides entre les tirets. L'Ecodyn ne mesure donc pas le marquage mais chacune des marques. Les valeurs mesurées sont des valeurs physiques de performance optique intrinsèque de l'objet. L'Ecodyn ne mesure donc pas la différence qui existe entre les lignes continues et les lignes discontinues et entre des lignes ou des marques de taille différente.

VisiNex™ mesure quant à lui la visibilité du marquage en tant qu'ensemble de marques et est donc sensible à la discontinuité des marques, et à leur espacement. Pour VisiNex™, un marquage linéaire axial de type T1 (rapport vide/plein de 10m/3m) sera moins visible qu'un marquage linéaire axial de type T3 (rapport vide/plein de 1.33m/3m). De même, un marquage linéaire axial de type T3 (rapport vide/plein de 1.33m/3m) sera moins visible qu'une ligne continue (pleine sans vide).

Les acquisitions Ecodyn et les acquisitions VisiNex™ nocturnes ne mesurent donc pas la même chose, et leurs résultats ne sont donc pas comparables : avec une photométrie individuelle mesurée par Ecodyn plus faible, un marquage axial de type T3 peut être malgré tout plus visible qu'un T1 en raison de sa densité visuelle supérieure ; avec une photométrie individuelle mesurée par Ecodyn plus faible, un marquage axial de type ligne continue peut être malgré tout plus visible qu'un T3 en raison de sa densité visuelle supérieure.

Les mesures de visibilité des marquages routiers obtenues avec VisiNex™ n'induisent pas nécessairement de moduler la réflectométrie de chacune des marques ou de chaque ensemble de marques (T1/T3/ligne continue). En effet, si la lisibilité du marquage augmente avec sa largeur et sa continuité, l'information transmise n'a pas la même valeur pour l'usager : les informations délivrées sont de plus critiques en termes de sécurité routière. Le marquage axial discontinu de type T1 concerne la section courante, et ne signale pas de danger particulier. Sa moindre visibilité par rapport à une ligne moins discontinue – à valeur photométrique égale – n'induit pas de problème particulier. Cette partie du projet SARI VIZIR sera poursuivie dans le cadre du FUI7 SURVIE avec VALEO, Saint-Gobain, LCPC, LRPC Clermont Ferrand, Oktal, pour utiliser VisiNex™ sur banc fixe et embarqué, ce qui permettra de comparer les technologies de

restauration de la visibilité (véhicule et infrastructure), et prolonger la partie recherche et développement, en travaillant sur l'amélioration de la rapidité de la méthode de calibration et sur les adaptations nécessaires aux évaluations embarquées pour la partie véhicules et la partie infrastructures.

Références

- Agent, K.R. et Stamatiadis, N. (1996), "Development of Accident Reduction Factors", Kentucky Transportation Transport, KT
- Carlsson, A. & Lundkvist, S-O. (1992), "Wide Lanes on a Major Road. Road User Effects of Alternative Roadway Painting on a Major Road". VTI 687. VTI [in Swedish]
- Crow (1997), "Handbook categorizing roads based on sustainable safety; Part I (Provisional, functional and operational requirements)", Publication no.116. Information SWOV publication R-2003-31 35 and Technology Centre for Transport and Infrastructure (CROW), Ede.
- Davidse, R., van Driel, C. and Goldenbeld, C. (2004), "The Effect of Altered Road Markings on Speed and Lateral Position", R2003-31, SWOV Institute for Road Safety Research, Leidschendam, Netherlands.
- European Commission / Directorate General Transports (1999), European Co-operation in the Field of Scientific and Technical Research: COST 331 Requirements for Horizontal Road Marking, Luxembourg.
- Harney and Robert (2005). "Combat Systems vol. 1: Sensors", Chapter 14: Imaging and Image-based Perception. 2005. http://www.nps.navy.mil/se/harney/cbt1ch14.pdf.
- Johnson, J. (1958), "Analysis of Image Forming Systems," in Image Intensifier Symposium, AD 220160 (Warfare Electrical Engineering Department, U.S. Army Research and Development Laboratories, Ft. Belvoir, Va., 1958), pp. 244–273.
- Nexyad et Aximum (2008), Projet SARI Vizir, Livrable 3.3.2. Rapport d'expérimentations avant/après en virage concernant les améliorations par signalisation adaptée (maximisation des critères de visibilité nocturne et des prémisses de la lisibilité, évaluation de l'amélioration de la performance des indicateurs de visibilité nocturne et de lisibilité), 29 août, 34.
- Pyne, H.C., Dougherty, M.S., Carsten, O.M.J. and Tight, M.R. (1995), "A Simulator Based Evaluation of Speed Reduction Measures for Rural Arterial Roads", Working Paper, Institute of Transport Studies, University of Leeds, Leeds, UK.
- Rumar, K. and Marsh, D. K. (1998), "Lane Markings in Night Driving", UMTRI-98-50. Michigan: The University of Michigan, Transport Research Institute.
- Schagen, I.N.L.G. van & Janssen, S.T.M.C. (2000), "Sustainable Safety in the Netherlands", in: IATSS Research 24(2), p. 18-27
- Yahiaoui, G. and Da Silva Dias, P. (2003), "On Board Visibility Evaluation for Car Safety Application: a Human Vision Modeling Based Approach", ITS Madrid.

ÉTUDES SPECIFIQUES EN CONDITIONS METEOROLOGIQUES DEGRADEES POUR LA SECURITE ROUTIERE : APPROCHES EXPERIMENTALES ET MODELISATION

M. COLOMB
CETE de Lyon, LRPC Clermont-Ferrand, France

J. DUMOULIN
LCPC, Nantes, France

V. BOUCHER
CETE de l'Ouest, LRPC d'Angers, France

M. MARCHETTI
CETE de l'Est, LRPC de Nancy, France

F. BERNARDIN
CETE de Lyon, LRPC Clermont-Ferrand, France

P. MORANGE
CETE de Lyon, LRPC Clermont-Ferrand, France

Résumé

Le risque routier est augmenté en conditions météorologiques dégradées, en particulier en conditions de brouillard où la gravité des accidents est multipliée par 2. Les expérimentations sur site réel s'avèrent difficiles en raison des risques qu'elles présentent et aussi en raison de la difficulté de la prévision du phénomène sur un site géographique précis. C'est pourquoi, les travaux de recherche s'appuient à la fois sur la modélisation pour la prévision des phénomènes et sur des expérimentations dans une infrastructure où les paramètres caractéristiques du brouillard sont contrôlés en temps réel. Ce centre d'expérimentation du Réseau scientifique et Technique du Ministère du Développement Durable, est situé au CETE de Lyon, Laboratoire de Clermont-Ferrand. Il permet de vérifier la pertinence des modèles de visibilité mais aussi de tester la performance de nouveaux équipements de signalisation ou de nouveaux systèmes embarqués dans le véhicule pour l'aide à la conduite. Des exemples d'études sont présentés afin d'illustrer la diversité des approches possibles.

Mots-clés: Brouillard, sécurité routière, expérimentation, visibilité, signalisation, véhicule

Abstract

In adverse weather conditions accident risk is increased, especially in foggy conditions where the accident severity is multiplied by 2. Experiments on actual sites are difficult because of the unsafe conditions and also because of the difficulty of predicting the phenomenon in a specific geographical site. Therefore, the researches are based both on modelling for the prediction of phenomena and on experiments in an infrastructure where the fog physical parameters are monitored in real time. This experimental centre is located at Clermont-Ferrand at the laboratory of CETE de Lyon, department of the scientific and Technical Network of the Ministry of Sustainable Development. It allows to verify the adequacy of visibility models but also to test the performances of new signal equipments or new onboard systems for driving assistance in the vehicle. Examples of studies are presented to illustrate the various possible approaches.

Keywords: Fog, Road Safety, Experiment, Visibility, Signalling, Vehicle

1. Introduction

Le réseau scientifique du ministère du développement durable est impliqué dans les activités de recherche liées à la prévention des accidents. En conditions de conduite spécifiques, telles que la perte de visibilité par temps de brouillard, l'efficacité de nouvelles technologies est étudiée afin de définir des stratégies pour l'amélioration de la sécurité des transports. En effet, la sécurité routière peut être fortement impactée en situation de faible visibilité, en présence de brouillard tout particulièrement. Réaliser des expériences sur une autoroute dans le brouillard réel est difficile et peut être dangereux. C'est la raison pour laquelle une plate-forme de recherche et développement, a été créée au laboratoire de Clermont-Ferrand. Cette infrastructure de recherche est utilisée pour évaluer les performances des nouvelles technologies, pour tester la modélisation des phénomènes atmosphériques et la vision du conducteur en conditions de visibilité réduite. Cet équipement permet une approche globale, qui couvre les 3 composantes du système : l'infrastructure, le véhicule et le conducteur. Afin d'illustrer ces différents aspects, nous présenterons tout d'abord la plate-forme de simulation de brouillard et ses équipements, puis quelques exemples d'études qui ont été réalisés en collaboration avec le LCPC, l'INRETS. Enfin, nous développerons une étude plus récente sur les technologies Infra-Rouge, qui fédère les différents acteurs de l'Opération de recherche PALM, Prévisions et Alerte en situations Météorologiques dégradées.

2. La plate-forme de recherche et développement « Brouillard »

2.1 Description générale

Ce centre d'expérimentation appelé aussi « salle de brouillard », est un équipement unique en Europe. Il permet la génération de brouillard artificiel dans une enceinte de 30 mètres de long, 5,5 mètres de largeur et 2,5 mètres de haut (Figure 1). Sa structure en deux parties permet de réaliser des essais en conditions diurnes (serre) et nocturne (tunnel ou sur la totalité de l'infrastructure).

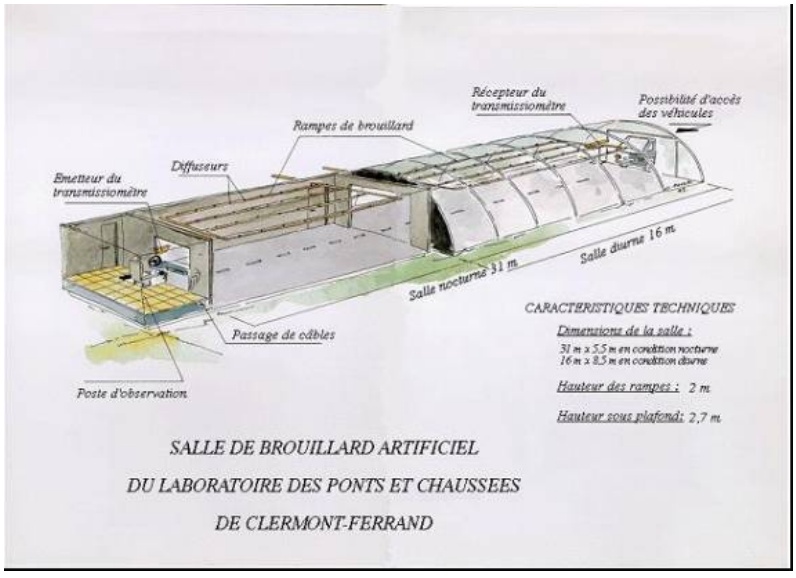


Figure 1 - Représentation de la chambre à brouillard, Colomb et al. (2008-1)

L'avant d'un véhicule équipé de ses projecteurs est positionné au droit d'une cabine permettant l'observation d'une scène routière en présence de brouillard. Le sol est constitué d'un enrobé drainant qui évacue l'eau utilisée pour la génération du brouillard. La serre permet l'accès de véhicules par l'extérieur. La génération du brouillard, pilotée par un micro-ordinateur, se fait par des buses de pulvérisation d'eau sous haute pression. Afin de produire des gouttelettes de taille

différentes (comme dans le brouillard naturel), il est nécessaire d'agir sur l'eau d'admission (déminéralisée ou non), la pression (de 30 à 70 bars) et le type d'injecteur utilisé (aiguille ou vortex). Le projet européen FOG (2000-2003) a permis de développer une méthode de stabilisation de la densité du brouillard lorsque la visibilité est inférieure à 100 m. Deux familles de distribution des gouttelettes peuvent être proposées. Les principales caractéristiques sont données dans Colomb et al. (2008-1).

Une scène routière peut être reproduite avec une signalisation horizontale et verticale en présence de véhicules avec leurs phares et leurs feux de brouillard arrière. D'autres équipements peuvent enrichir la scène routière en fonction de l'objectif des études.

L'intérêt de l'infrastructure repose sur la caractérisation en temps réel des paramètres physiques du brouillard, leur contrôle et leur reproductibilité pour des brouillards denses, avec une visibilité inférieure à 100 m. Des observations sont possibles pour de plus grandes visibilités mais dans ce cas le brouillard n'est plus homogène, et la précision sur les paramètres mesurés est moins grande.

2.2 Les paramètres contrôlés

La visibilité météorologique

La densité du brouillard est mesurée par le biais d'un transmissiomètre connecté au système d'acquisition de données. Il mesure le facteur de transmission atmosphérique, T, défini comme le rapport entre le flux lumineux ϕ_0 émis par une source lumineuse et le flux ϕ de lumière transmise à travers une atmosphère brumeuse, qui peut être calculé par la loi de Bouguer-Lambert :

$$T = \frac{\Phi}{\Phi_0} = e^{-kd} \qquad (1)$$

où k représente le coefficient d'extinction du brouillard et d la distance entre l'émetteur et le récepteur.

Toutefois, il est plus commode de caractériser le brouillard par une distance de visibilité que par T ou k qui sont des paramètres physiques difficiles à appréhender. La distance de visibilité ou « portée optique météorologique », Vm, est définie par l'Organisation météorologique mondiale (WMO 1997) comme la distance à laquelle un objet de 5% de contraste avec son fond est tout juste visible. Elle peut être déduite de la loi de Koeschmieder. En notant ε le seuil de contraste, qui est supposé être de 5%, la distance de visibilité météorologique peut être donnée par :

$$V_m = \frac{-\ln \varepsilon}{k} = \frac{-\ln(0{,}05)}{k} \approx \frac{3}{k} \qquad (2)$$

Cette relation fait le lien entre le coefficient d'extinction k et la distance de visibilité météorologique, Vm. Ainsi, avec la relation (1), le facteur de transmission atmosphérique T, issue du transmissiomètre, permet de calculer la visibilité météorologique Vm.

La granulométrie du brouillard

Comme indiqué ci-dessus, la visibilité est liée au coefficient d'extinction qui dépend de la granulométrie du brouillard. La relation entre les caractéristiques microphysiques du brouillard et la diffusion de la lumière, est donnée par la définition du coefficient d'extinction, *k*, qui caractérise le brouillard, d'un point de vue optique:

$$k = \pi \sum_i S_i n_i a_i^2 \qquad (3)$$

où S_i, facteur d'efficacité de diffusion, est déterminé par les équations de Lorenz-Mie, et n_i est le nombre de particules ayant un rayon a_i. Aussi il est important de pouvoir mesurer ces caractéristiques, concentration et diamètre des gouttelettes. La distribution des gouttelettes de brouillard est obtenue à l'aide d'un granulomètre optique, le capteur Palas mesurant la lumière diffusée à 90 °. Les diamètres accessibles à la mesure vont de 0,4 à 40 micromètres. Ce capteur a permis de caractériser les granulométries de brouillard dans le cadre du projet européen FOG (2000-2003).

Les caractéristiques photométriques de la scène routière

Les caractéristiques photométriques de la scène routière sont déterminées à l'aide d'un videophotocolorimètre (figure 2) ayant une sensibilité élevée à des niveaux de luminance faible, les recherches portant essentiellement sur des conditions de conduite nocturnes. Ce nouveau capteur a été soigneusement comparé à des photomètres standards (Colomb et al, 2008-2), les photomètres restant la référence dans le domaine de la mesure de la luminance.

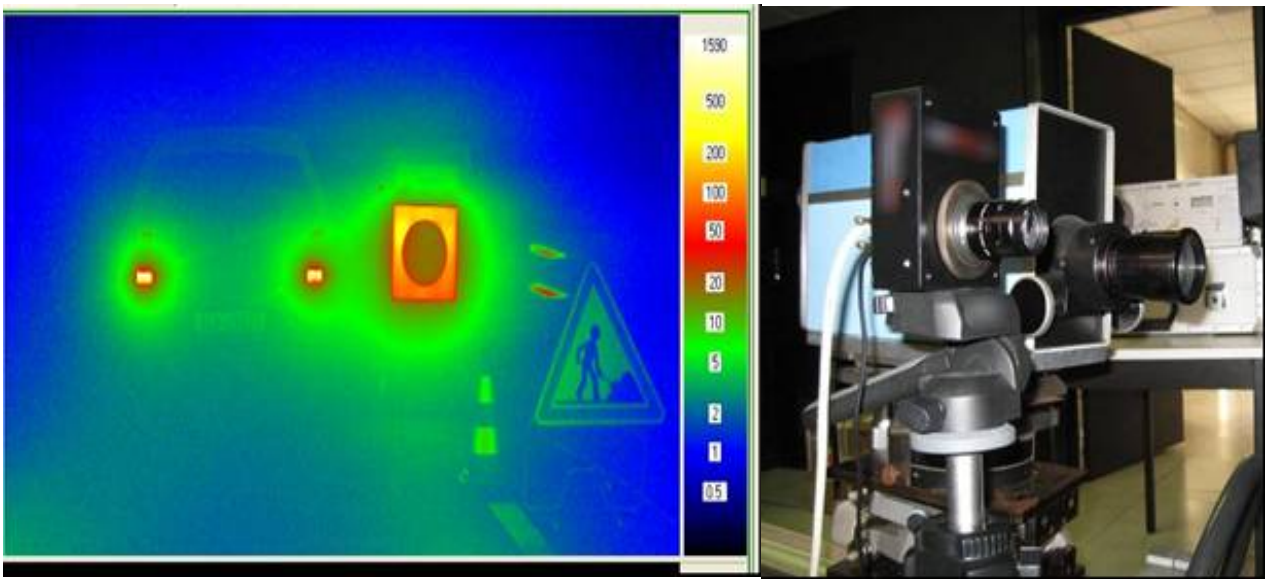


Figure 2 - Le vidéo-photocolorimètre avec un photomètre standard, et une image en fausses couleurs de la scène visuelle graduée en luminance (cd/m^2)

3. Exemples d'études dans la chambre à brouillard

Comme indiqué précédemment, cette installation permet une approche globale de la perception de la route dans des conditions statiques. Des exemples sont donnés de diverses études dans le domaine des nouvelles technologies (performance des équipements), le comportement du conducteur (estimation de la distance), des simulations (validation des modèles), et la vision (perception des couleurs). Puis les recherches plus récentes sur les systèmes de vision infrarouge seront développées.

3.1 Performances de panneaux à message variable

Une étude spécifique sur les performances de panneaux à message variable alphanumériques a été entreprise avec la Highways Agency, Royaume-Uni, afin de définir l'intensité lumineuse nécessaire pour assurer la visibilité dans un brouillard diurne ou nocturne. Les performances des différentes technologies (fibres optiques, diodes émettrices de lumière, et plus tard, les technologies à cristaux liquides) ont été évaluées (Colomb et al, 1997). La lisibilité de pictogrammes colorés de panneaux lumineux a également été étudiée dans le cadre du projet

européen Cromateam (Cromateam 1999-2002). Ces travaux ont permis de définir les niveaux lumineux adaptés aux conditions de brouillard dense et les limites de certaines technologies.

Figure 3 – Exemple de tests sur des panneaux lumineux en brouillard de jour.

3.2 Estimation des distances dans le brouillard

En ce qui concerne le comportement des conducteurs, les psychologues de l'INRETS ont essayé de déterminer les principales explications du risque accru d'accident et les modifications de comportement dans le brouillard. Certaines hypothèses ont été avancées : les difficultés de perception dues à l'altération de l'espace et la perception du mouvement dans le brouillard.

Figure 4 - Exemple de test d'estimation des distances avec un véhicule équipé de feux arrière antibrouillard.

La perception de la distance s'appuie sur des indices de profondeur qui sont considérablement réduits, en particulier dans un épais brouillard la nuit. Des expériences avec des observateurs dans la chambre de brouillard, (figure 4), ont montré qu'il y a une surestimation des distances (25% dans le brouillard pendant la journée et 55% en nuit de brouillard) peut se produire dans des conditions de brouillard dense, où le conducteur ne peut percevoir que les feux arrière du

véhicule qui précède (Cavallo et al, 2001). Ces résultats pourraient contribuer à expliquer la tendance constatée dans certaines conditions, à se rapprocher du véhicule qui précède en conduite en file, ce véhicule pouvant être perçu plus loin qu'il n'est en réalité. Ces expérimentations réalisées en statique ont été complétées par des tests sur simulateur de conduite qui confortent cette tendance en brouillard dense de nuit. Cet effet s'estompe lorsque la visibilité augmente et lorsque l'on retrouve la perception de la silhouette complète du véhicule, de jour en particulier (Caro et al, 2009).

3.3 Simulation de la luminance rétrodiffusée

Afin de produire des images de synthèse en conditions de brouillard pour les simulateurs de conduite, un modèle, utilisant la méthode de Monte Carlo et basée sur les processus de diffusion multiple, a été élaboré par le LCPC : PROF (Dumont et al, 2005). Il a été appliqué pour évaluer la lumière rétrodiffusée par les feux de croisement. Des expériences dans la chambre de brouillard ont contribué à la validation de la valeur de luminance de la lumière rétrodiffusée. Des capteurs ont été placés dans la salle afin de contrôler le flux lumineux émis par les projecteurs d'un véhicule dans différentes directions. Puis la luminance rétrodiffusée dans la direction géométrique d'observation d'un conducteur au volant d'un véhicule léger a été mesurée en plaçant un photomètre à la place d'un conducteur dans le poste d'observation. Les valeurs enregistrées en pu être comparées aux prévisions du modèle.

3.4 Réduction de l'acuité visuelle et de la vision des couleurs dans le brouillard

La diffusion de la lumière est l'un des facteurs les plus critiques qui affectent les performances visuelles de l'être humain. Par la réduction des contrastes, elle a un impact sur l'acuité visuelle et la perception des couleurs. Cet aspect a été étudié avec le laboratoire de la Vision de l'Université de Riga, en Lettonie, par l'utilisation de stimuli colorés dans la chambre à brouillard, optotypes standards comme le Landolt-C, mires fréquentielles ou lumières pulsées colorées. Les principaux effets observés sont une réduction du contraste de couleur qui induit une baisse de l'acuité visuelle (Ozolinsh et al. 2006). L'analyse de la diffusion de la lumière dans le brouillard a pu être comparée avec la diffusion intraoculaire dans le cristallin pour des yeux normaux et des yeux affectés par la cataracte.

4. Perception de l'infrastructure par un système de vision infrarouge

Les systèmes d'aide à la conduite de nuit et par temps de brouillard font appel à des technologies de vision artificielle à l'aide de caméras ou autres capteurs de type radar utilisant diverses longueurs d'ondes. Des expérimentations ont été menées pour des équipementiers et des constructeurs automobiles et sont soumises à confidentialité. Nous présenterons ici l'étude menée récemment avec le LCPC, (Dumoulin et al, 2007) qui s'est concentrée sur les propriétés thermo-optiques de l'infrastructure dans le spectre infrarouge.

Des études sur la vision infrarouge dans les automobiles, on déjà porté sur la détection d'animaux, des piétons et d'obstacles de nuit ou dans de mauvaises conditions météorologiques avec une visibilité réduite. Des systèmes existent pour la détection des piétons avec des détecteurs allant de 5 à 25 m. Mais dans ces approches, les propriétés thermo-optiques de l'infrastructure n'avaient pas été étudiées afin d'améliorer la visibilité des conducteurs. L'évaluation du bilan radiatif de l'ensemble du système (à savoir la route et son environnement) à différentes périodes de la journée et aux différentes bandes de longueurs d'ondes des capteurs infrarouge est nécessaire. L'objectif est de définir les besoins d'amplification du contraste thermique pour restituer la perception de l'itinéraire sur de plus grandes distances en conditions de brouillard. Ces travaux ont été engagés dans le projet européen NR2C, New Road

Construction Concepts, (NR2C, 2002-2007) dans le 6ème PCRD. Ils ont associé des simulations (dans le spectre infrarouge et visible) avec des expériences de caractérisation des propriétés radiatives de matériaux routiers (Marchetti et al, 2008), sur routes et en salle de brouillard dans des conditions nocturnes.

Modèle simplifié pour la transmission atmosphérique dans l'infrarouge

Un modèle numérique basé sur la théorie de Mie (1908) et de Van de Hulst (1981), a été développé. Il a incorporé plusieurs caractéristiques macroscopiques du brouillard : diffusion, absorption, et les coefficients d'extinction. Le modèle a été utilisé pour calculer les propriétés optiques du brouillard à partir de données expérimentales (distribution des gouttelettes), acquises dans le tunnel de brouillard. Le coefficient d'extinction est calculé pour différentes longueurs d'onde. Dans domaine du visible, l'extinction et de coefficient de diffusion pourraient être fusionnés (absorption négligeable). Pour l'infrarouge lointain l'absorption n'est plus négligeable. Une validation expérimentale est effectuée en salle de brouillard.

Les essais dans la chambre à brouillard

La scène étudiée dans le tunnel de brouillard dans des conditions de nuit est présentée en Figure 5. Les caméras infrarouges ont été placées directement dans le tunnel, pour être dans des conditions les plus proches des applications routières, même si les images ne sont obtenues qu'en mode statique. Pendant les essais, un panneau chauffé, actif dans l'Infrarouge, est placé à l'extrémité de la salle.

Figure 5 - Panneau éclairé par une lampe halogène (gauche) et emplacement des caméras infrarouges (droite)

La figure 6 présente l'évolution de la transmission du signal de la cible en fonction de la visibilité météorologique. Il est observé que pour les petites gouttes, 5% du signal est transmis pour une visibilité de 12 m dans la bande LWIR (7.5-13 μm) et pour 20 m pour la bande MWIR (3 - 5 μm). Pour les autres tailles des gouttelettes, les valeurs chutent à 22 m dans la bande spectrale LWIR, ainsi, l'efficacité de la vision infrarouge dans des conditions de brouillard de nuit dépend du type de brouillard.

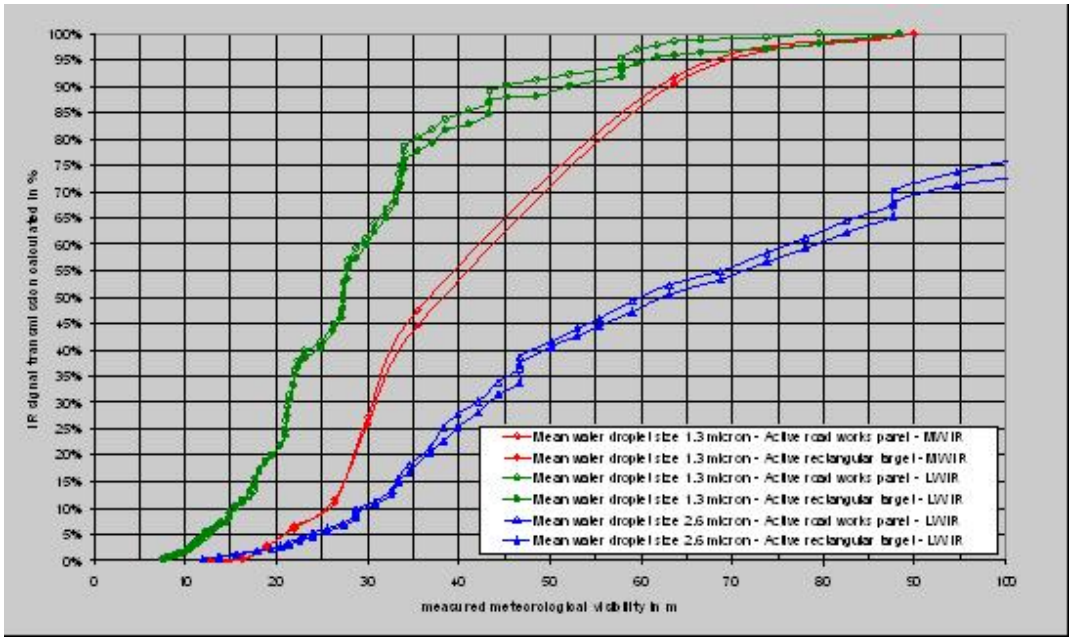


Figure 6 - Evolution de la transmission en infrarouge en fonction de la visibilité pour différents essais: 2 types de brouillard, 2 cibles et 2 bandes spectrales infrarouges

5. Conclusion

La salle de brouillard a été utilisée depuis de nombreuses années afin de contribuer aux études et recherches sur la sécurité des transports. Cette infrastructure de R&D permet d'avoir une approche technologique par le test de produits innovants. Elle permet aussi d'étudier la perception du conducteur qui joue un rôle majeur dans la tâche de conduite. L'exemple de l'étude des technologies infrarouges montre l'intérêt de cette infrastructure de recherche pour des expériences contrôlées pour valider ou compléter la modélisation des processus physiques.

A l'issue de ces diverses études, il ressort que cette infrastructure répond à un besoin spécifique d'expérimentation en conditions contrôlées. Ainsi l'acquisition en temps réel de la visibilité météorologique et de la granulométrie du brouillard permet d'avoir des données physiques utiles pour modéliser ou simuler par image de synthèse ces conditions extrêmes de la conduite. De plus la fourniture d'images de la scène visuelle, calibrées en luminance permet de faire le lien avec la vision du conducteur et les modèles de visibilité. L'ensemble de ces paramètres seront très utiles pour les prochaines recherches visant à comparer les performances des technologies de la « vision artificielle » à celles de la vision humaine. En effet la prise en compte des aspects perceptifs du conducteur est un élément déterminant pour proposer des solutions technologiques adaptées au contexte spécifique de la tâche de conduite.

Par contre, au cours des différentes études il a été noté que la principale limitation de l'infrastructure réside dans ses dimensions. La longueur actuelle de 30 mètres de long crée une contrainte expérimentale lorsque l'on veut étudier les conditions limites de visibilité. Il est alors nécessaire de travailler uniquement en brouillard dense (visibilité inférieure à 50 m) voir très dense (visibilité de l'ordre de 10 m). Un projet d'infrastructure de plus grandes dimensions, longueur de 100 à 150 mètres est à l'étude afin de mieux répondre aux besoins des utilisateurs. Les questions relatives aux performances des capteurs par tout temps se posent également en conditions de pluie. C'est pourquoi la reproduction de ce phénomène météorologique est

également à l'étude en complément du brouillard dans le cadre de l'Opération de recherche PALM, Prévision et Alerte en situations Météorologiques dégradées.

Remerciements

Les auteurs remercient la Commission Européenne pour le soutien apporté aux projets FOG, CROMATEAM, NR2C, qui ont donné lieu en partie aux travaux de recherche présentés dans ce document.

Références

- Caro, S., Cavallo, V., Marendaz, C ., Boer, E.R., Vienne, F. (2009)**,** "Can Headway Reduction in Fog Be Explained by Impaired Perception of Relative Motion"**,** Human Factors**,** Vol. 51, No. 3, June, pp. 378-392
- Cavallo, V, Colomb, M., Doré, J. (2001), "Distance perception of rear lights in fog", Humans Factors, Vol 43, n° 3, pp 442-451
- Colomb, M. , Hirech, K. , André, P., Boreux, J.-J., Lacote, P. and Dufour, J. (2008-1), "An innovative artificial fog production device improved in the European project FOG", Journal of Atmospheric Research, 87, 242–251.
- Colomb M., Greffier, F., Fournela and Morange, P. (2008-2), "Visual perception model of road users in nocturnal fog using videophotometric image analysis", Congrès international VISION, 7-8 octobre, Versailles, France.
- WMO (1997), **"**Guide for instruments and meteorological observation method", Edition n°6, World Meteorological organization, WMO-n°8
- Colomb, M., Legoueix, G., Smith, M., Aston, M. and Williams, T. (1997), "Visibility of variable message signs in fog", 7th International Conference on Vision in Vehicles - 14 - 18 Sept. – Marseille, France.
- Cromateam (1999-2002)**,** "Colour Research for Outdoor Matrix liquid crystal display Applied To Electronic Advertising and Message boards"**,** European project, IST- contract n°: 1999-20614
- Dumont, E., Paulmier, G., Lecocq, P. and Kemeny, A. (2005), "Assessment of the simulation of low beams backscattering in fog", in Proceedings of the ISAL Symposium.
- Dumoulin, J., Boucher, V., Marchetti, M., and Colomb, M. (2007), "Infrared vision on roads in fog and/or night conditions: Experiments in a fog tunnel and numerical simulations", Conference on Advanced Infrared Technology Application, AITA2007, Mexico, Leon-Guanajuato, 8-12 Oct.
- FOG (2000-2003), "Improvement of transport safety by control of fog production in a chamber", European project, Growth contract n°G6RD-CT-2000-00211.
- Marchetti, M., Ibos, L., Boudenne, A., Datcu, S., Candau, Y., Dumoulin J. and Livet J. (2008), "Analysis of the radiative behavior of road materials: Principles and measurements of infrared emissivity", Bull. Lab. Ponts et Chaussées, 272, pp 45-55.
- Mie, G. (1908), "Optics of turbid media », Ann. Phys. 25 (3), pp 377-445.
- NR2C (2002-2007), "New Road Construction Concepts", European project, contract n°-SUSTDEV 2002-3.2.2.2.6
- Ozolinsh, M., Colomb, M., Ikauniesks, G. and Karitans, V. (2006), "Color stimuli perception in presence of light scattering", Visual neurosciences, 23, pp.597-601.
- Van de Hulst, H.C. (1981), "Light Scattering by small particles", ed Dover.

EVALUATION DE L'IMPACT DE SYSTEMES D'INFORMATION EN VIRAGE SUR LE COMPORTEMENT DES USAGERS

Eric VIOLETTE **Peggy SUBIRATS** **David DOUCET**
CETE Normandie-Centre, ERA34,
Rouen, France

Résumé
Les accidents en virages sont la principale cause d'insécurité sur les routes de rase campagne. La connaissance des risques en virages est un enjeu de sécurité important pour proposer des systèmes d'information aux usagers en complément des possibilités actuelles de signalisation offerte par les recommandations en vigueur. Les thèmes RADARR et IRCAD du projet SARI ont abordé cette problématique par la conception et la mise en œuvre de systèmes d'information respectivement basés sur le risque lié à la rupture physique apportée par le virage dans le cas de RADARR et sur le risque en conditions météorologiques dégradées dans le cas d'IRCAD. Dans cet article, nous présentons l'évaluation de l'impact de ces systèmes d'information sur le comportement des usagers.

Mots-clés: comportement des conducteurs, virage, signalisation, vitesse pratiquée, route bi-directionnelle.

Abstract
Accidents in curve are the main cause of safety problems on rural roads. Knowledge of risk in curves is an important safety issue to provide user information systems in addition to the existing signing in current recommendation. Both SARI/RADARR and SARI/IRCAD projects aim at developing and implementing information systems providing drivers with better information about the driving difficulties facing them and about difficulties they may fail to perceive correctly. SARI/RADARR concerns physical discontinuities in the road especially curves and SARI/IRCAD concerns deterioration caused by wind and rain. In this paper, we present the assessment of both developed systems on drivers speed.

Keywords: driver behavior, curve, road signs, operating speed, rural roads.

1. Contexte

Nous présentons dans cet article deux systèmes d'alerte permettant de mieux informer les conducteurs des difficultés de conduite auxquelles ils doivent faire face.

Ces systèmes d'information ont été mis en œuvre dans le cadre précisé ci-dessous :

- SARI/RADARR (Recherche des Attributs pour le Diagnostic Avancé des Ruptures de la Route) concerne la mise en place sur des itinéraires routiers d'un système d'information alertant les conducteurs d'un risque de perte de contrôle de leur véhicule. Le risque étudié est celui lié à une rupture physique de l'itinéraire en rase campagne.
- SARI/IRCAD (Informer des Risques de rupture de l'itinéraire en Conditions Atmosphériques Dégradées) complémentaire au thème précédent, s'intéresse au risque lié à une dégradation brutale de l'adhérence du fait de la pluie, qui peut être aggravé par l'effet éventuel du vent.

2. Systèmes d'information

2.1 RADARR

Le système d'information du thème RADARR (Violette, 2009a) a été élaboré à partir de la situation initiale du virage, en proposant dans un premier temps une mise en conformité de la signalisation en utilisant les recommandations du SETRA (2002) puis en proposant un renforcement de cette signalisation par un dispositif d'alerte lumineux destiné aux usagers ayant une vitesse d'approche inadaptée au franchissement du virage. Le virage sélectionné pour l'expérimentation se situe dans les Côtes-d'Armor, sur la Route Départementale n°8, au PR1+810 dans le sens Guingamp - Bourbriac (PR croissant).

Le système mis en place dans le cadre de RADARR est présenté en détail dans (Subirats et al., 2010).

2.2 IRCAD

Dans le projet de recherche IRCAD (Violette, 2009b), le système d'information des usagers en situation d'adhérence dégradée a été conçu selon les principales modalités suivantes :

- Une alerte générale déclenchée par un état critique de la chaussée propice à la perte de contrôle. Cette alerte s'adresse à l'ensemble des usagers de la route pour indiquer un risque spécifique à partir de capteurs météos seuls ; sans mesure de vitesse des véhicules
- Une alerte individuelle non ciblée déclenchée par une vitesse d'approche excessive. C'est une alerte déclenchée par un usager de la route particulier dont la vitesse a été détectée comme présentant un risque par rapport à une situation spécifique. Elle est individuelle car elle repose sur la détection d'un véhicule particulier et sur l'envoi d'un message à son / leur attention. Elle est non ciblée car l'identification du ou des véhicules n'est pas restituée dans le message d'alerte. Par exemple : « attention, vitesse trop élevée chaussée mouillée adhérence réduite ». Cette phase a été déployée après la phase d'alerte générale.

Le principe de fonctionnement du système d'information est succinctement décrit ci-après :

- Alerte générale : le PMV A4 est allumé lorsque la hauteur d'eau mesurée sur la chaussée est supérieure à 0.05mm.
- Alerte individuelle non ciblée : Ce mode est actif si l'alerte générale est déjà activée. Le PMV A1 est allumé dans le cas ou un véhicule est détecté en approche avec une vitesse incompatible avec le franchissement du virage. Le critère de décision est le dépassement

d'un seuil adaptatif de vitesse qui varie selon la hauteur d'eau présente sur la chaussée et modélisée par une fonction de risque.

Le système d'information IRCAD a été expérimenté sur deux sites localisés sur les routes du Conseil Général des Cotes d'Armor : RD786 entre Binic et Saint-Quay-Portrieux et RD 786 entre Lannion et Saint-Michel-en-Grève[7].

Le système mis en place dans le cadre de IRCAD est présenté en détail dans (Subirats et al., 2010).

3. Objectifs et hypothèses de travail

Pour les deux systèmes d'information, l'objectif principal est d'évaluer si ces dispositifs ont une influence sur le comportement des usagers qui se manifeste par une modification observable et mesurable de paramètres de la conduite tels que la vitesse par exemple. Pour évaluer ces impacts, il est fait l'hypothèse que les systèmes d'information auront une influence sur les vitesses pratiquées par les usagers lors de la phase d'approche et de franchissement des virages Pour ce faire, un dispositif de mesure a été déployé sur les sites expérimentaux durant les différentes phases de fonctionnement de la signalisation.

Les objectifs et hypothèses sont les suivants :

- Pour la phase de référence, les principaux objectifs sont d'appréhender l'écoulement du trafic sur le site expérimental afin de discriminer le cas échéant des motifs de déplacement. Pour les différentes modalités préalablement identifiées, les vitesses pratiquées seront analysées sur les différents points de mesure afin d'obtenir une situation de référence.
- Pour la phase de mise en conformité de RADARR et la phase Alerte générale d'IRCAD, le principal objectif est d'évaluer l'impact du renforcement de la signalisation du virage (allumage du PMV dans le cas d'IRCAD) sur les vitesses pratiquées en approche et en franchissement du virage. L'hypothèse formulée est que pour cette phase, il sera observé une réduction des vitesses pratiquées dans l'approche finale et en franchissement du virage par rapport à la phase de référence.
- Pour la phase d'alerte individuelle, le principal objectif est d'évaluer, par rapport à la phase de mise en conformité (alerte générale pour IRCAD), le comportement spécifique de la population des usagers qui ont été effectivement alertés. Pour ce faire, les populations suivantes ont été discriminées :
    - pour la phase de mise en conformité (alerte générale), la part des usagers qui aurait dû être alertée si le dispositif d'alerte avait été déployé
    - pour la phase d'alerte, la population des usagers effectivement alertés

L'hypothèse formulée est que l'impact de la signalisation d'alerte individuelle se traduit par une réduction des vitesses pratiquées en aval du message délivré par le signal d'alerte prévu à cet effet (feux à éclats pour RADARR et second PMV pour IRCAD).

[7] Sur ce site, les PMV ont été regroupés sur un seul support en proposant aux usagers les deux pictogrammes en alternat lors de l'alerte individuelle non ciblée.

4. Protocole d'évaluation

4.1 Mesures des vitesses pratiquées

La mesure des vitesses pratiquées a été effectuée à partir de dispositifs de mesures capables de délivrer des mesures individuelles à chaque passage de véhicule. Ces mesures permettent ainsi une analyse microscopique du trafic. Les capteurs associés sont des boucles électro-magnétiques car cette technologie dispose d'une bonne qualité métrologique d'une part (précision des mesures de vitesse <= 5%) et la discrétion de ces capteurs ne perturbe pas le comportement des usagers circulant sur les sites.

Pour chaque passage de véhicule, les informations suivantes sont recueillies et mémorisées : horodate, vitesse, longueur, temps inter véhiculaire (TIV). Ces mesures permettent d'accéder aux comportements individuels des usagers d'une part et de procéder à des agrégations selon des modalités qui permettent d'être indépendant du trafic d'autre part.

4.2 Localisation des mesures

Le tableau 1 précise la localisation (exprimée en m) des mesures de vitesse réalisées par rapport aux éléments de signalisation déployés sur les sites expérimentaux en tenant compte des contraintes d'implantation des sites.

Tableau 1 : Localisation de la signalisation et des mesures de vitesse

RADARR		**IRCAD(Binic)**		**IRCAD(St Michel)**	
V1	-250m	***V1***	-225m	***V1***	-185m
		PMV alerte générale	-175m	***V2***	-110m
Panneau A1 + **V2**	-150m	***V2***	-115m	PMV alerte générale et individuelle	-60m
V3	- 50m	PMV alerte individuelle	-65m		
Début virage	0m	***V3***	-15m	***V3***	-10m
J4+feux	+30m/ +45m	Début virage	0m	Début virage	0m
V4	+55m	***V4***	+135m	***V4***	+95m

4.3 Traitements et indicateurs élaborés

Afin d'obtenir des populations comparables pour les différentes phases de fonctionnement des systèmes d'information, plusieurs traitements ont été réalisés afin de ne retenir que la part des véhicules en interaction avec l'infrastructure routière.

A partir des mesures individuelles recueillies à chaque véhicule, les traitements suivants ont été réalisés :

- classification des véhicules libres/contraints : libres si TIV>=5secondes
- classification des typologies de véhicules : VL (longueur<7m) / PL (longueur>10m)
- identification des conditions locales de trafic et des motifs de déplacement :
  - Semaine / Week-end
  - Jour / Nuit
  - Heures de pointe / Heures creuses
- identification des conditions météorologiques avec mesure de la hauteur d'eau sur la chaussée, dans le cas d'IRCAD.

Ces traitements préalables permettent de contrôler les éventuels facteurs d'influence sur les vitesses pratiquées. A l'issue de cette phase, on dispose de distributions de vitesses individuelles pour différentes populations d'usagers clairement identifiées. Dans les distributions des vitesses, on cherche alors à exprimer les indicateurs synthétiques suivants :

- V_{50} : 50ième centile de la distribution des vitesses
- V_{85} : 85ième centile de la distribution des vitesses
- d'autres centiles peuvent être exprimés, tels que V_{90} par exemple.

Pour les analyses présentées dans les chapitres suivants, seuls les véhicules légers « libres » (Olivero & Jacob, 2009) ont été pris en compte. Cinq modalités de trafic ont été considérées : semaine/trafic pointe du soir, semaine/trafic de fond, semaine/nuit, week-end/jour et week-end/nuit.

4.4 Recueils réalisés

Pour le projet RADARR, nous disposons d'environ un mois et demi de mesures pour la phase référence, un mois de mesures pour les phases de mise en conformité et d'alerte.

Pour le projet IRCAD, nous disposons d'environ trois mois de mesures pour la phase référence, cinq mois de mesures pour la phase d'alerte générale et sept mois de mesures pour la phase d'alerte individuelle.

5. Analyses effectuées et résultats obtenus

5.1 RADARR : Mise en conformité de la signalisation

L'impact de la mise en conformité de la signalisation a été analysé immédiatement après la mise en oeuvre de la nouvelle signalisation. Pour cette analyse, on dispose d'échantillons d'environ 30000 véhicules pour la modalité semaine/jour, 100 véhicules pour les modalités semaine/nuit et week-end/jour et 3000 véhicules pour la modalité week-end/nuit.

La figure 1 synthétise les mesures de vitesses pratiquées pour la modalité trafic de fond, de jour en semaine.

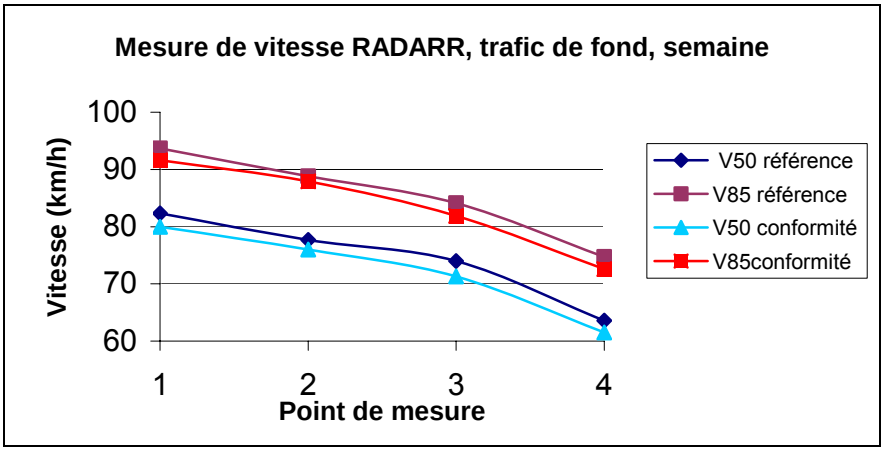


Figure 1 - Mesure de vitesse RADARR, trafic de fond, de jour en semaine

Les vitesses pratiquées en amont du virage (point1) sont conformes à celles généralement mesurées sur ce type d'itinéraire. L'effet virage est d'environ 20 km/h pour les différents indicateurs. D'abord, les usagers réduisent leur vitesse d'environ 10 km/h dans les 200m qui séparent les points 1 et 3. Puis dans les 50m qui précèdent l'entrée du virage jusqu'au point de

corde, soit une distance de 100m, il est observé une diminution de près de 10 km/h. Les décélérations correspondantes sont faibles, respectivement 0.25 et 0.50 m/s². Ces niveaux de décélération montrent que la majorité des usagers ne freinent pas pour franchir le virage.

La mise en conformité de la signalisation ne fait pas apparaître une réduction des vitesses plus sensible à partir du point de mesures 2 qui correspond à la localisation de la signalisation avancée, ni d'ailleurs pour les points de mesures suivants. Les écarts de vitesse entre les deux phases ne montrent pas de différence entre le point de mesure 1 (non impacté par la nouvelle signalisation) et les autres points de mesures susceptibles d'être impactés par la nouvelle signalisation. Pour les autres modalités de trafic, il apparaît des résultats légèrement différents : lors de la pointe du soir, les vitesses de franchissement du virage sont plus rapides (2km/h) et le week-end, les vitesses de franchissement du virage sont plus faibles (-3 km/h). Ce résultat confirme celui trouvé en 1998 lors du programme de recherche européen SAFESTAR (1998) : *le renforcement de la signalisation des virages n'a pas d'impact sur les vitesses*.

En conclusion, si la mise en conformité de la signalisation a un impact sur le comportement des usagers, celui-ci n'est pas détecté par la mesure des vitesses pratiquées lors des périodes en semaine. Par contre, l'impact est plus perceptible lors des week-end puisque les usagers réduisent progressivement leur vitesse en utilisant l'ensemble de la zone d'approche du virage.

5.2 RADARR : Alerte individuelle

La phase d'alerte individuelle a été évaluée par rapport à la phase de mise en conformité en tenant compte du fait qu'un nouveau système de mesure a été utilisé. Comme pour la mise en conformité, l'impact a été évalué immédiatement après la mise en œuvre de la nouvelle signalisation. Les populations suivantes ont été identifiées :

- phase de référence : la population qui aurait du être alertée si la signalisation avait été mise en œuvre
- phase alerte individuelle : la population qui a été effectivement alertée[8] par le dispositif

Pour cette analyse, on dispose d'échantillons d'environ 1000 véhicules pour les modalités semaine/jour, semaines/pointe du soir et week-end/jour, environ 300 véhicules pour les modalités semaine/nuit et week-end/nuit. Le tableau 2 synthétise les écarts de vitesse observés sur les différents points de mesure pour les deux phases analysées.

Tableau 2 : Écarts des vitesses pratiquées (km/h) RADARR

Modalités		**Point 1**	**Point 2**	**Point 3**	**Point 4**
Semaine	**Fond de jour**	-0.4	+0.9	-4.4	-4.5
	Pointe soir	-0.6	+1.3	-4.0	-4.0
	Nuit	*+1.4*	*+3.7*	*-2.3*	*-1.1*
Week-end	**Jour**	+0.1	+2.5	-3.5	-2.9
	Nuit	*+0.5*	*+3.0*	*-3.3*	*-5.5*

Les vitesses d'approche (point1) sont très proches pour les deux phases analysées. Au second point de mesure, les vitesses pratiquées sont supérieures de quelques km/h lors de la phase d'alerte individuelle. Pour les deux couloirs de mesures suivants (points 3 et 4), il apparaît que les vitesses lors de la phase d'alerte sont significativement inférieures à celle de la phase de

[8] Les véhicules alertés sont ceux qui circulent avec une vitesse mesurée au point 1 supérieure à 93km/h (V85 de l'itinéraire).

conformité. Les écarts relevés pour ces deux points de mesure laissent à penser que le renforcement de la signalisation par des feux à éclats à un effet positif sur les vitesses à la fois dans l'approche finale du virage (écart d'environ 3.5 km/h) que dans le franchissement du virage (écarts pouvant être supérieurs à 5 km/h).

5.3 IRCAD : Référence

L'analyse des vitesses pratiquées durant la phase de référence a pour principal objectif d'évaluer l'impact de l'état de surface de la chaussée en l'absence d'un message d'alerte délivré aux usagers. La modalité route sèche (resp. mouillée) est définie pour les hauteurs d'eau inférieures à 0.05mm (resp. supérieure ou égale à 0.05mm).

Pour les deux sites expérimentaux les mesures de vitesses ont montré lorsque la route est mouillée que :

- les vitesses sont inférieures (pour toutes les modalités analysées et pour tous les points de mesures des vitesses) à celles observées par temps sec
- la réduction des vitesses est limitée à quelques km/h de jour (typiquement comprises entre –1 et –3km/h). Cette diminution est plus sensible la nuit (comprises entre –5km/h et –6 km/h)
- la réduction des vitesses est pratiquement constante sur l'ensemble des points de mesures (indépendamment de leur localisation)

L'ensemble de ces constats est similaire aux résultats obtenus dans le cadre des travaux menés dans par E.Violette (2002) qui ont montré un effet de la pluie sur les vitesses pratiquées et pas d'effet virage par temps de pluie (caractérisé par le fait que les usagers ne réduisent pas leur vitesse plus sensiblement pour franchir le virage lorsque la route est mouillée).

5.4 IRCAD : Alerte générale

Durant la phase d'alerte, le PMV correspondant rappelle la signalisation de danger portée par le pictogramme A4. Les figures 2 et 3 synthétisent les écarts de vitesse (route sèche/route mouillée exprimés en km/h) observés entre la phase de référence et l'alerte générale.

Sur le site de Binic, il apparaît un effet positif du message d'alerte délivré par le PMV. Cet effet se traduit par une diminution des vitesses pratiquées plus importante dans la situation « route mouillée » durant laquelle le PMV est activé. Ainsi, il apparaît que la réduction des vitesses durant cette phase est augmentée de 5 à 7 km/h par rapport aux même conditions de la phase de référence. Ce constat est réalisé pour l'ensemble des points de mesure de vitesse.

Sur le site de St Michel, il apparaît un effet positif du message d'alerte délivré par le PMV, mais cet effet semble plus limité que celui observé sur le site de Binic.

L'analyse des vitesses pratiquées tant dans la phase d'approche que lors du franchissement du virage n'a pas permis de mettre en évidence un effet virage sur route mouillée qui serait caractérisé par une réduction des vitesses encore plus marquée pour franchir le virage lorsque la route est mouillée.

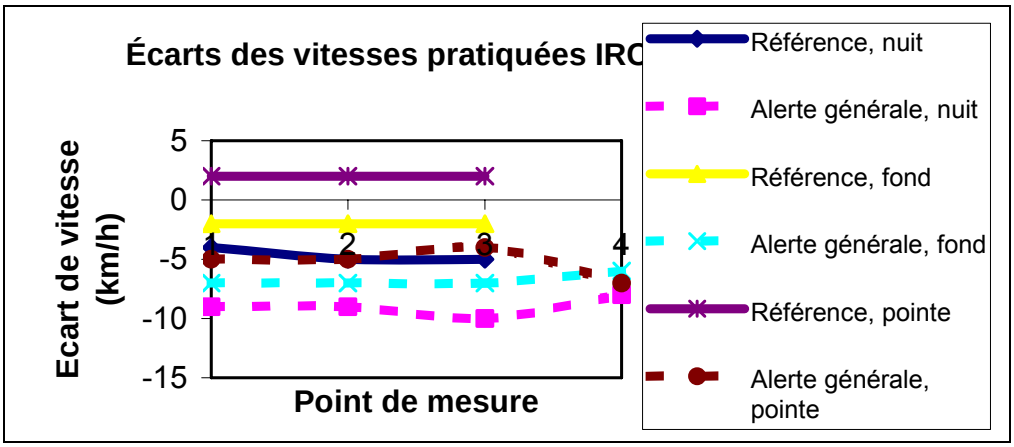


Figure 2 - Écarts des vitesses pratiquées IRCAD site de Binic

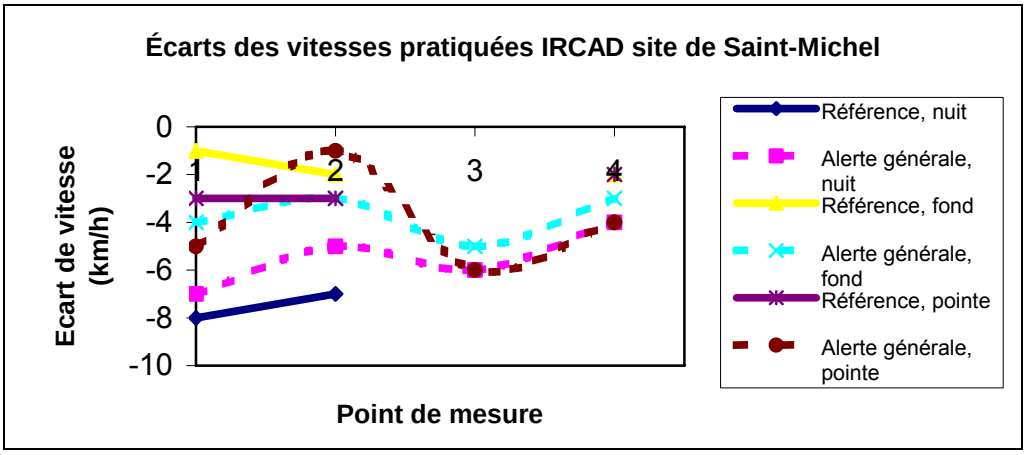


Figure 3 - Écarts des vitesses pratiquées IRCAD site de Saint-Michel

5.5 IRCAD : Alerte individuelle

La phase d'alerte individuelle a été évaluée sur le seul site de Binic car la fonction de risque associée à cette modalité n'a pas eu le fonctionnement attendu[9] sur le site de St Michel. De plus la configuration du site expérimental de Binic n'a pas permis d'accéder aux trajectoires individuelles des véhicules permettant de discriminer ceux qui ont été effectivement alertés. Ainsi, il n'est pas possible de comparer la population des véhicules alertés dans cette phase par rapport à ceux qui auraient dû l'être dans la phase précédente.

La mesure de l'impact a été réalisée en procédant de la manière suivante :

- élaboration des distributions de vitesse pour les points de mesure 1 et 3
- classification des hauteurs d'eau mesurées entre 0.05mm et 0.69mm en 4 classes pour estimer les vitesses de déclenchement de l'alerte.
- calcul de la différence V1-V3 pour les centiles des distributions pour les phases alertes générale et individuelle.

L'hypothèse est faite que cette différence sera plus importante dans la partie haute des distributions des vitesses puisque cela correspond à la part des usagers qui ont été alertés.
Le tableau 3 synthétise le résultat de cette approche.

[9] La fonction de risque associée à l'alerte individuelle a été ajustée localement pour n'alerter que les 15% des usagers les plus rapides.

Tableau 3 : Écarts des vitesses pratiquées entre V1 et V3 (exprimés en km/h) IRCAD site de Binic

	0.05mm<H2o<0.09mm		0.10mm<H2o<0.19mm		0.20mm<H2o<0.39mm	
	%	V1-V3	%	V1-V3	%	V1-V3
Usagers non alertés	80%	**-2**	70%	**-1**	65%	**-1**
Usagers probablement alertés	5%	**-3**	5%	**-1**	10%	**-2**
Usagers certainement alertés	15%	**-2**	25%	**-1**	25%	**-1**

La part des usagers alertés varie avec la hauteur d'eau présente sur la chaussée. Cependant, la part de la population alertée est sensiblement celle initialement attendue. Les colonnes V1-V3 ne font pas apparaître de différence selon que les usagers ont été alertés ou non alertés. En particulier, l'écart V1-V3 n'est pas plus important pour la part des usagers effectivement alertés. Ce constat laisse à penser que le second PMV associé à l'alerte individuelle n'impacte pas significativement les vitesses dans la zone qui encadre le PMV.

6. Synthèse et perspectives

Les travaux présentés dans cet article décrivent l'évaluation de systèmes d'information en virages en distinguant deux principaux types de risques : perte de contrôle en fonction des caractéristiques du virage (RADARR) ou perte de contrôle en fonction des conditions météorologiques dégradées (IRCAD). Cette évaluation a été réalisée en faisant l'hypothèse que les systèmes déployés auraient une influence sur les vitesses pratiquées par les usagers..

Les résultats relatifs au projet RADARR ont mis en évidence une absence d'impact de la mise en conformité de la signalisation sur les vitesses confirmant ainsi des résultats issus d'études précédentes. La phase d'alerte individuelle a montré une réduction sensible des vitesses pratiquées en approche finale du virage et pour franchir le virage pour la population des usagers qui ont effectivement été alertés par la signalisation lumineuse. Par rapport à la population qui aurait du être alertée si le dispositif avait été en service durant la phase de mise en conformité, il a été observé des réductions de vitesse moyenne pouvant atteindre 5 km/h selon les modalités d'écoulement de trafic. Ce résultat montre que le dispositif de renforcement de signalisation par feux d'alerte présente une réelle efficacité.

Pour ce projet, deux investigations complémentaires apparaissent intéressantes :

- La définition et la mise en œuvre d'un panneau additionnel expliquant aux usagers le principe de fonctionnement de la signalisation d'alerte.
- La nouvelle réglementation concernant la signalisation d'alerte en virage par balises J4 mono chevron munies de feu d'alerte pourrait être avantageusement expérimentée et évaluée sur ce site qui dispose de l'instrumentation nécessaire.

Les résultats relatifs au projet IRCAD ont confirmé les résultats des précédentes études au sujet du faible impact des conditions météorologiques dégradées sur les vitesses pratiquées. La phase d'alerte générale a montré un impact positif du PMV renforçant la signalisation de danger existante. Cet impact est d'environ 5km/h dans le cas de Binic et limité à 1 ou 2 km/h à St Michel. La phase alerte individuelle basée sur une fonction de risque qui tient compte de la hauteur d'eau sur la chaussée et de la vitesse d'approche des usagers a été difficilement évaluée en raison de la difficulté à accéder à la population des usagers effectivement alertés. L'hypothèse

que le PMV associé à l'alerte individuelle provoque une diminution accentuée des vitesses n'a pas été vérifiée par rapport à la population qui n'a pas été alertée.

Les travaux menés dans le projet IRCAD ont permis de confirmer les résultats obtenus lors de projets précédents en particulier APTP. Il conviendrait de pouvoir réaliser une phase complémentaire destinée à recueillir les informations suivantes :

- route sèche / pas de pluie
- route sèche / début de pluie
- route mouillée / pluie
- route mouillée / pas de pluie (période de séchage)

Ces investigations permettraient de hiérarchiser les informations utilisées par les usagers pour adapter leur conduite en situation météorologique ou en condition d'adhérence dégradée

Références

- Brisbane, G., Vasiliou, A. (2002), "Dynamic warning signs act as Signs of rain", VAISALA News, p31-32.
- Delanne, Y., Violette, E. (2001), "Wet road accidents – Driver behavior, Safety margins and road design", Traffic Safety on 3 continents conference, Moscow.
- Olivero, P., Jacob, B. (2009), « Glossaire de la Métrologie du trafic et des trajectoires, version 5.4 », LCPC.
- SAFESTAR European Project (1998), "Improvement of models on the relation between speed and road characteristics".
- SETRA (2002), « Comment signaler les virages ? Signalisation verticale », Instruction Interministérielle de Signalisation Routière, 9ème partie.
- Subirats, P, Violette, E., Doucet, D., Aron, M. (2010), « Développement de systèmes d'information dynamique pour l'information au conducteur pour deux situations de conduite dangereuses », Actes de la conférence PRAC2010, LCPC, eds. B. Jacob& ML Gallenne, Paris, Mai 4-5.
- Violette, E. (2009a), « RADARR : Évaluation de l'impact du système d'information sur les trajectoires pratiquées par les usagers », CETE Normandie-Centre.
- Violette, E. (2009b), « IRCAD : Effet du système d'information sur le comportement des conducteurs », CETE Normandie-Centre.
- Violette, E. (2002), « Accidents Par Temps de Pluie, Comportement des usagers : Virages sur route bi-directionnelle, RD928, RD982, RN13 », CETE Normandie Centre.

DEVELOPPEMENT DE SYSTEMES D'INFORMATION DYNAMIQUE POUR LES CONDUCTEURS EN SITUATIONS DE CONDUITE DANGEREUSES

P. SUBIRATS **E. VIOLETTE** **D. DOUCET** **M. ARON**

CETE NC, ERA34
Rouen, France

INRETS
Marne-La-Vallée, France

Résumé

Les accidents en virage sont la principale caractéristique de l'insécurité sur les routes de rase campagne. La connaissance des risques en virage est un enjeu de sécurité important pour proposer des systèmes d'information aux usagers en complément des possibilités actuelles de signalisation offerte par les recommandations en vigueur. Les thèmes IRCAD et RADARR du projet SARI ont abordé cette problématique par la conception et la mise en œuvre de systèmes d'information respectivement basés sur le risque en conditions météorologiques dégradées dans le cas d'IRCAD et sur le risque lié à la rupture physique apportée par le virage dans le cas de RADARR. Dans cet article, nous présentons deux systèmes d'informations dynamiques informant mieux les conducteurs des difficultés de conduite auxquelles ils doivent faire face. Ces dispositifs ont été définis en tenant compte des exigences réglementaires relatives à la signalisation dynamique.

Mots-clés: comportement des conducteurs, virage, signalisation, vitesse pratiquée, route bi-directionnelle.

Abstract

Accidents in curve are the main characteristic of safety problems on rural roads. Knowledge of risk in curves is an important safety issue to provide user information systems in addition to the existing signing in current recommendation. Both SARI/IRCAD and SARI/RADARR projects aim at developing and implementing information systems providing drivers with better information about the driving difficulties facing them and about difficulties they may fail to perceive correctly. SARI/IRCAD concerns deterioration caused by wind and rain and SARI/RADARR concerns physical discontinuities in the road especially curves. In this paper, we present two information dynamic system providing drivers with better information about the driving difficulties facing them. These systems have been developed considering the regulation requirements for dynamic signs.

Keywords: driver behavior, curve, road signs, operating speed, rural roads.

1. Introduction

Nous présentons dans cet article deux systèmes d'alerte permettant de mieux informer les conducteurs des difficultés de conduite auxquelles ils doivent faire face.

Ces systèmes d'information[10] ont été mis en œuvre dans le cadre ci-dessous :

- SARI/IRCAD (Informer des Risques de rupture de l'itinéraire en Conditions Atmosphériques Dégradées) s'intéresse au risque lié à une dégradation brutale de l'adhérence du fait de la pluie, qui peut être aggravé par l'effet éventuel du vent.
- SARI/RADARR (Recherche des Attributs pour le Diagnostic Avancé des Ruptures de la Route) concerne la mise en place sur des itinéraires routiers d'un système d'information alertant les conducteurs d'un risque de perte de contrôle de leur véhicule. Le risque étudié est celui lié à une rupture physique de l'itinéraire en rase campagne.

2. Système d'information des risques de rupture d'un itinéraire en conditions atmosphériques dégradées

2.1 Contexte

Une dégradation des conditions atmosphériques peut avoir des conséquences dramatiques sur la sécurité des conducteurs. Le contrôle d'un véhicule peut être rendu difficile, voire impossible, lorsque la chaussée est glissante. Le risque de sortie de route est d'autant plus important si le conducteur est surpris par des sollicitations subies sur une route habituellement sans risque. Le thème IRCAD vise à informer les conducteurs de l'apparition des zones dangereuses sur leur itinéraire par temps pluvieux. Il s'agit d'utiliser au mieux des données disponibles sur un itinéraire routier pour identifier des zones nécessitant une information occasionnelle due à des conditions atmosphériques dégradées.

Le projet IRCAD s'appuie sur deux sites expérimentaux localisés sur le réseau du Conseil Général des Côtes d'Armor : Binic et Saint-Michel en Grève. Les objets routiers supports de l'expérimentation sont des virages qui ont des caractéristiques pertinentes vis à vis des objectifs généraux du projet IRCAD

2.2 Principe du système

Fonctionnement général

Le projet de recherche IRCAD vise à définir un système d'information des usagers en situation d'adhérence dégradée selon les principales modalités suivantes :

- Une alerte générale déclenchée par un état critique de la chaussée propice à la perte de contrôle. Cette alerte s'adresse à l'ensemble des usagers de la route pour indiquer un risque spécifique à partir de capteurs météos ou d'état de la chaussée, sans mesure de vitesse des véhicules. Un exemple de message est : « attention, chaussée mouillée / adhérence réduite ».
- Une alerte individuelle non ciblée déclenchée par une vitesse d'approche excessive. C'est une alerte déclenchée par un usager de la route particulier dont la vitesse a été détectée comme présentant un risque par rapport à une situation spécifique. Elle est

[10] L'évaluation de l'impact de ces systèmes sur le comportement des usagers est présentée dans la communication n°17. Le lecteur désirant plus de détails pourra s'y reporter.

individuelle car elle repose sur la détection d'un véhicule particulier et sur l'envoi d'un message à son attention. Elle est non ciblée car l'identification du véhicule n'est pas restituée dans le message d'alerte. L'alerte individuelle n'est activée que lorsque les conditions d'alerte générale le sont aussi. Elle vient donc renforcer le message d'alerte générale.

Les médias de signalisation associés au système d'information sont des Panneaux à Messages Variables (PMV) dont :

- La définition s'appuie sur les recommandations de la 9ième partie de l'Instruction Interministérielle de Signalisation Routière. En particulier la signalisation par PMV est exclusivement destinée à renforcer une signalisation de danger existante.
- La conception des PMV s'appuie sur les normes en vigueur. En particulier, les pictogrammes et/ou mentions doivent appartenir à ceux existant dans la réglementation.
- La mise en œuvre sur le terrain doit respecter les recommandations en vigueur en fonction du type de route. En particulier, la dimension des PMV est adaptée au type de route et les distances longitudinale et latérale d'implantation doivent respecter les règles de lisibilité (distance entre panneaux) et de sécurité (les panneaux ne doivent pas constituer des obstacles).

Sur le site de Binic, le système d'information est constitué des éléments suivants :

- Un PMV pictogramme A4 (attention chaussée glissante) + mention « RAPPEL » afin de renforcer le panneau de danger A4 existant. Ce panneau est commandé par une mesure de la hauteur d'eau. La hauteur d'eau mesurée est comparée à un seuil de déclenchement. Le panneau est activé pour l'alerte générale exclusivement.
- Un PMV pictogramme A1 (attention virage) + mention « RALENTIR » afin de renforcer le panneau de danger A1d (attention succession de virages) existant. Ce panneau est commandé par une mesure de vitesse en amont du virage. La vitesse mesurée est comparée à un seuil de déclenchement issu de l'application d'une fonction de risque qui dépend des caractéristiques du virage et de la hauteur d'eau. Ce PMV est activé pour l'alerte individuelle exclusivement.

Sur le site de St Michel, le système d'information est constitué des éléments suivants :

- Un seul PMV supportant les deux pictogrammes présentés ci-avant. Dans le cas de l'alerte générale, seul le premier pictogramme est activé. En cas d'alerte individuelle, les deux pictogrammes sont présentés en alternat.

Les PMV

Pour les systèmes d'information déployés sur les deux sites, les PMV possèdent les principales caractéristiques techniques suivantes :

- Être conformes à l'arrêté du 28 juin 2006 relatif aux performances et aux règles de mise en service des panneaux de signalisation à messages variables soumis à l'obligation de marquage CE.
- Les performances exigées sont fixées en référence à la norme NF EN 12966-1de janvier 2006.
- Ils sont de gamme normale au sens de la norme XP P 98-532-9 de janvier 2007. Ils sont constitués d'un caisson comprenant un pictogramme en décor lumineux discontinu et un panonceau. Les pictogrammes et les textes des panonceaux sont à messages pré-définis et ils sont affichés en mode clignotant.

- Les PMV sont alimentés à partir du réseau public 230 volts monophasé et respectent dans ce cas les exigences de la norme NF EN 12966-1 de janvier 2006, en particulier vis à vis de la sécurité des personnes en cas de défaut ou d'accident.
- Le support des PMV est de type mât central. Le support est fixé sur le massif d'ancrage à l'aide d'une embase boulonnée. La classe du moment de flexion du mât ne doit pas dépasser 570 daN.m.
- Les PMV sont implantés entre 1.50m et 2.00m du sol (hauteur sous panneau). Latéralement, ils sont implantés de manière à respecter les recommandations en vigueur applicables en rase campagne.

La figure 1 illustre les pictogrammes et mentions lors de l'allumage des PMV.

Figure 1 - St Michel : PMV Pictogrammes A4 / A1d en alternat

Système de commande de la signalisation

Le système de contrôle/commande de la signalisation est architecturé autour d'un enregistreur de données qui est interfacé autour de différents dispositifs extérieurs décrits figure 2.

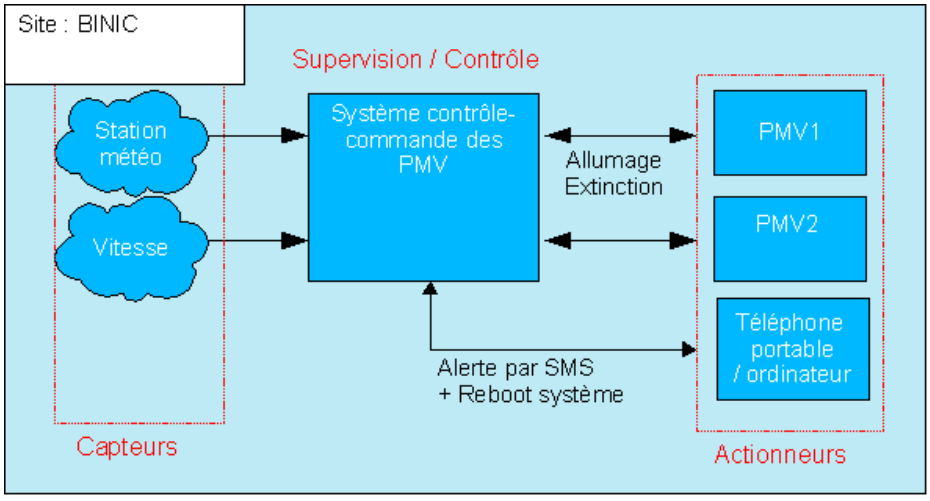


Figure 2 - Principe de fonctionnement du système de contrôle/commande

Le système de contrôle/commande est opérable à distance par liaison téléphonique, il assure une fonction d'horodatage et de stockage d'information (résolution : minute).

Fonction de risque

Pour la phase alerte générale, la mesure de hauteur d'eau est effectuée par un capteur VAISALA modèle DSC111. L'information est transmise, traitée et stockée toutes les minutes par le dispositif de contrôle/commande. Lorsque la hauteur est supérieure ou égales à 0.05 mm, le dispositif commande l'allumage du PMV1.

Pour la phase alerte individuelle, en plus de l'information hauteur d'eau, le système utilise une mesure de vitesse en approche du virage délivrée par un radar doppler SFERIEL modèle SURVEYOR1.

Cette mesure de vitesse est transmise à chaque passage de véhicule pour être comparée à un seuil appelé : vitesse de déclenchement. La vitesse de déclenchement est calculée par une fonction de risque (Gothié, 2007a et b) implémentée dans le système de contrôle/commande dont le principe général est le suivant (figure 3) :

- Calcul du coefficient de frottement transversal mobilisable ($CFT_{mobilisable}$) en fonction de la hauteur d'eau mesurée sur le site (chaque minute).
- Calcul de la vitesse cible à ne pas dépasser dans le virage.
- Calcul de la vitesse de déclenchement ($V_{sécurité}$) ajustée en fonction des vitesses pratiquées en approche du virage.

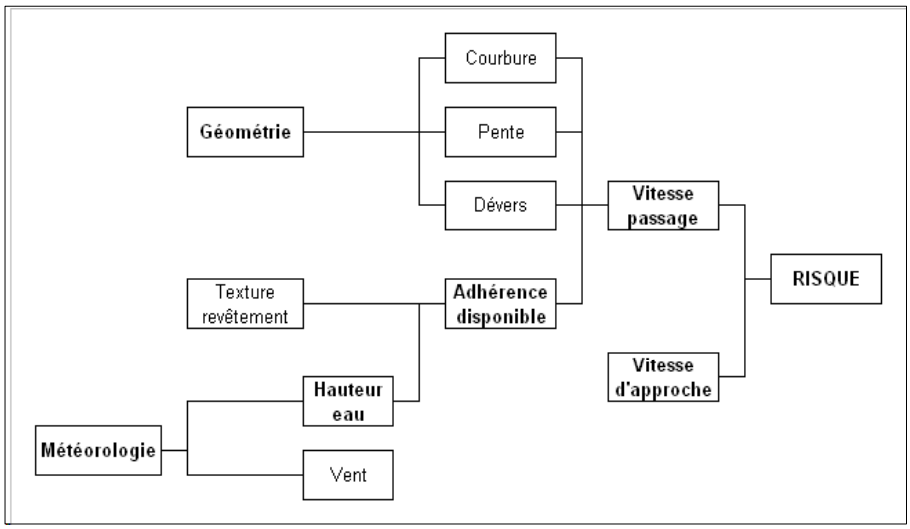


Figure 3 - Principe de fonctionnement de la fonction de risque

Les formulations de la fonction de risque sont rappelées ci-dessous :

$$CFT_{mobilisable} = -0.081 \times \ln\left(\frac{h_{eau}}{2.62}\right) + 0.35 - 0.05 \quad (1)$$

$$V_{sécurité} = 3.6 \times \sqrt{\left(\frac{CFT_{mobilisable}}{1.87} + \delta\right) \times 9.81 \times R} \quad (2)$$

Les formulations dépendent des caractéristiques de chacun des sites expérimentaux avec :
h_{eau} = hauteur d'eau mesurée, R = rayon du virage, δ = dévers.

Les constantes des formules ont été ajustées aux caractéristiques des sites et aux vitesses pratiquées par les usagers. En particulier, bien que généralement la vitesse de sécurité corresponde à un tiers de l'adhérence mobilisable (soit un coefficient 3 au dénominateur de la formule 2) il faut tenir compte de la baisse de la vitesse des usagers entre l'amont du virage où est placé le radar de mesure de la vitesse (qui déclenche le cas échéant l'alerte individuelle) et le virage proprement dit ; un coefficient de 1.87 a été calibré à partir de cette baisse, mesurée à Binic durant la période de référence. L'ajustement de la fonction de risque doit permettre de n'alerter que les 15% des usagers les plus rapides. La figure 4 illustre l'allure de cette fonction.

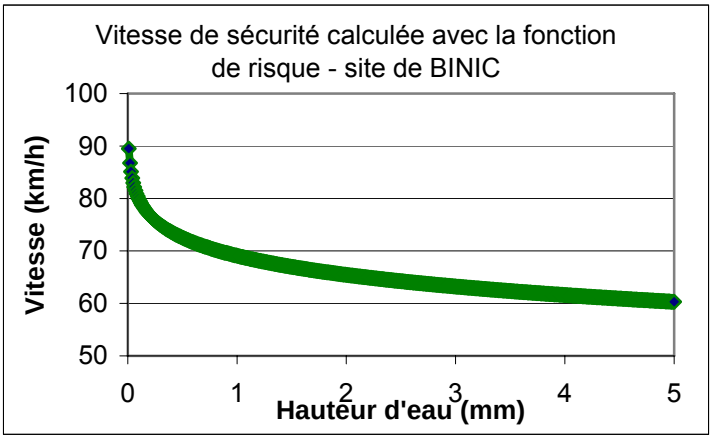


Figure 4 - Allure de la variation de la vitesse de sécurité/hauteur d'eau

3. Système d'information alertant les conducteurs d'un risque de perte de contrôle de leur véhicule en virage

3.1 Contexte

Les travaux du thème RADARR concernent la mise en place sur des itinéraires routiers d'un système d'information alertant les conducteurs d'un risque de perte de contrôle de leur véhicule. Le risque étudié est celui lié à une rupture physique de l'itinéraire en rase campagne.

3.2 Choix du virage

La définition du système d'information destiné aux usagers s'est appuyée sur la démarche de conception suivante :

- Analyse de la signalisation existante par visite d'expert.
- Proposition de scénario à évaluer.
- Alerte individuelle non ciblée.
- Schéma de définition de la signalisation à mettre en place.

Le virage sélectionné pour l'expérimentation se situe dans les Côtes-d'Armor, sur la Route Départementale n°8, au PR1+810 dans le sens Guingamp - Bourbriac (PR croissant).

Le virage a été choisi en raison de la multiplication des caractéristiques accidentogènes qu'il présente. En effet, avant le projet, le virage possédait un niveau de signalisation faible, c'est-à-dire uniquement des balises J1. De plus, il est précédé d'un alignement droit qui favorise une vitesse relativement importante en approche. Ensuite, la forêt environnante maintient le virage dans une zone d'ombre continue qui favorise l'humidité de la chaussée. D'un point de vue plus technique, le rayon de courbure minimum de ce virage est de 82 mètres et le dévers maximum est de 8%. Le sens du dévers est vers l'intérieur puisqu'il s'agit d'un virage à droite, il favorise donc le franchissement. Il est à noter que le dévers est très important pour un rayon de cette

valeur. Une étude montre que plus de la moitié des accidents corporels surviennent dans des virages ayant un rayon inférieur à 150 mètres (Dupré 2007). De plus, les virages ayant une signalisation J1 seule représentent 38% des virages accidentés. Cette étude conforte donc les critères de choix du virage. La photo aérienne de la figure 5 permet de visualiser la géométrie de la route et l'environnement du virage de l'étude.

Figure 5 - vue aérienne du virage d'étude

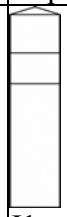
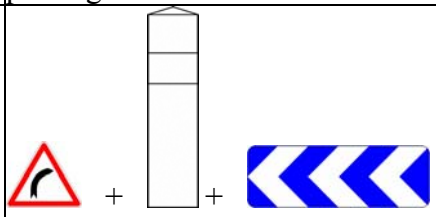
3.3 Mise en conformité de la signalisation existante

Le guide "Comment signaler les virages", SETRA, juillet 2002, permet de définir la signalisation d'un virage à partir de la différence entre la vitesse d'approche et la vitesse dans la courbe.

La vitesse d'approche est estimée à partir de la vitesse calculée dans le virage précédent, avec une accélération de 0,8 m/s^2 dans l'alignement droit, jusqu'à 75 m du début du virage.
La vitesse dans la courbe est fonction du rayon et correspond à la vitesse en dessous de laquelle roulent 85 % des usagers en conditions de circulation fluide. Elle est issue des abaques figurant dans la note d'information (série circulation, sécurité, exploitation) n°10 : "Vitesses pratiquées et géométrie de la route", SETRA, avril 1986. Ces vitesses sont plafonnées à 102 km/h.

La signalisation prévue par le guide dans le sens retenu pour l'expérimentation figure dans le tableau 1:

Tableau 1 - Signalisation conforme du virage RADARR

Vitesse d'approche	Vitesse dans le virage	Différentiel Vitesse	Signalisation en place	Signalisation prévue par le guide
102 km/h	70 km/h	- 32 km/h	 J1	 A1 + J1 + J4 trichevrons

Les différents points énumérés ci-dessous ont motivé la mise en place d'une signalisation conforme au guide du SETRA et présentée tableau 1 :

- Le virage est « dur »: faible rayon (83m) associé à une longueur importante (108m).
- Dans le sens Guingamp - Bourbriac (retenu pour l'expérimentation), la section amont est facile et permet des vitesses d'approche relativement élevées.
- La lisibilité est bonne : présence des arbres et du talus en extérieur.

- La visibilité en approche du virage est moyenne : la courbe à gauche de grand rayon en approche nuit à la perception du virage.
- La visibilité dans le virage est moyenne : on ne voit pas la sortie, l'usager ne peut apprécier la longueur du virage.
- La rétro-réflexion des balises J1 en place n'est plus assurée.

De plus, compte-tenu de la longueur du virage une 2ème balise J4 tri-chevrons a été implantée.

3.4 Alerte individuelle

L'alerte individuelle non ciblée repose sur la détection des comportements inadaptés au franchissement du virage. Cette détection doit pouvoir être assurée à partir de caractéristiques de conduite ou de trajectoire observables par des dispositifs bord de route dont la technologie est aisément disponible. L'indicateur choisi est celui d'une vitesse d'approche excessive.

La génération d'une alerte individuelle élaborée à partir de la détection de vitesse excessive nécessite de définir les éléments suivants :

- La zone d'approche du virage.
- La vitesse de « sécurité » pour franchir le virage.
- La localisation de la détection de la vitesse.

L'origine de la zone d'approche du virage peut être définie par le début de la décélération en amont du virage. Pour déterminer ces valeurs (tableau 2), on s'appuie sur la littérature suivante :

- « Approche de la cinématique en virages à l'aide du Véhicule d'Analyse du Comportement du Conducteur » CETE NC SETRA, Mars 2000. L'étude adopte la définition suivante : L'origine de la zone d'approche est fixée à l'instant où le conducteur commence à réduire sa vitesse pour franchir le virage. La fin de la zone d'approche est le milieu du virage. L'étude montre que :
  - La longueur de la zone d'approche dépend du rayon du tracé en plan, et des stratégies de conduite du conducteur.
  - La longueur de la zone d'approche est donnée par le tableau ci-dessous.
  - L'accélération longitudinale maximale (mesurée sur 200 milli-secondes) observée sur la zone où le conducteur passe de la vitesse d'approche à la vitesse de franchissement varie suivant le rayon. Pour un virage de rayon 125m la moyenne est de 1.2m/s^2 et le 95^{ieme} centile est de 2.3m/s^2. Ces valeurs sont plus faibles pour des rayons plus grands.

Tableau 2 - Longueur de la zone d'approche d'un virage

Rayons	Longueur moyenne	Écart type	95^{ieme} centile	5^{ieme} centile
125	270	107	423	116
250	220	99	377	7
375	150	123	313	0

Dans le travail effectué par E.Violette et Al (2002), le comportement des usagers en approche et en virage est évalué à l'aide de deux capteurs, distants de 200m. Pour les virages étudiés ayant un rayon de 150m, les proportions d'usagers adoptant des décélérations (sur cette zone de 200m) supérieures à 1 m/s² sont comprises entre 1 et 6 % de l'ensemble des usagers.

A partir de ces éléments, il faut retenir que la zone d'approche pour le virage RADARR peut être estimée à 200m et que les décélérations adoptées sur cette zone par les usagers sont généralement faibles voire très faibles.

La note intitulée « Relations Vitesse / Courbure / Dévers » du SETRA établit une relation entre les caractéristiques géométriques d'un virage et les vitesses pratiquées. Les usagers ayant une vitesse supérieure au seuil physique conventionnel peuvent être considérés en situation d'accident. Pour la valeur de rayon de 83m du virage considéré, les abaques de cette note permettent de déterminer une vitesse maximale de 70km/h, comme seuil physique conventionnel.

La modélisation figurant dans l'étude « Vitesse pratiquée et géométrie de la route », SETRA 1986, donne également un V_{85} de 70km/h pour ce virage. Ce modèle est utilisé dans le guide « Aménagement des Routes Principales » (août 1994) d'une part, et dans le guide "Comment signaler les virages", SETRA, 2002, d'autre part.

A partir des éléments concordants énumérés ci-avant, il est proposé que la vitesse de « sécurité » pour ce virage soit fixée à 70km/h.

Il est rappelé que l'objectif de l'alerte individuelle non ciblée est d'avertir les usagers ayant vu le virage et n'ayant pas assez décélérés. La localisation de la détection de la vitesse repose sur une approche cinématique simple avec les hypothèses suivantes :

- (Tr) : temps de réaction égal à 2 secondes
- (Va) : vitesse d'approche des usagers les plus rapides égale à 102km/h
- (Vs) : vitesse de « sécurité » dans le virage égale à 70km/h
- γ : décélération[11] admise par les usagers égale à 2m/s²

La distance parcourue pendant Tr pour les usagers circulant à Va est égale à 56m.
La distance parcourue pendant le freinage est donnée par la relation : $(Va^2 - Vs^2)/2\ \gamma$. L'application numérique donne une distance de 106m.

Ainsi, la distance parcourue par un usager circulant à 102km/h pour réagir à un signal d'alerte et adapter sa vitesse est de 162m.

En conséquence, il est proposé d'implanter le capteur, servant à détecter les usagers en situation potentielle de danger, à environ 150m avant le début du virage.

Pour activer l'alerte individuelle, le choix du seuil de vitesse s'est principalement fondé sur les analyses détaillées d'accident en virage effectuées par l'INRETS et synthétisées dans le rapport n°262 : Les pertes de contrôle en courbe. L'approche proposée intègre à la fois les caractéristiques géométriques des virages, l'état de surface et les vitesses pratiquées. Il ressort de ces travaux que les accidents de type « dynamique » surviennent pour des vitesses supérieures à V_{85}, avec les distinctions suivantes :

- Sur route sèche : les vitesses sont extrêmes et marginales.
- Sur route mouillée : les vitesses sont proches de V_{85}.

De plus, dans le cas des accidents survenant à des vitesses inférieures, il existe des facteurs explicatifs particuliers tels que : défaut d'infrastructure, défaut du véhicule, véhicule particulier.

[11] Décélération adoptée par 5% des usagers environ. « Approche de la cinématique en virages à l'aide du Véhicule d'Analyse du Comportement du Conducteur » CETE Normandie-Centre / SETRA, mars 2000.

En conséquence, il a été proposé que la vitesse de déclenchement de la signalisation d'alerte individuelle soit fixée à V_{85} (des véhicules légers « libres »).

3.5 Mise en place du système d'alerte

Le système d'alerte individuelle non ciblée est composé des éléments suivants (figure 6) :

- Un dispositif de mesure de la vitesse implanté 150m avant le début du virage.
- 2 feux additionnels de type R1 implantés aux 2 extrémités des deux balises J4 tri-chevrons.

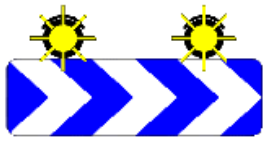


Figure 6 - Signalisation d'alerte individuelle non ciblée projet RADARR

Références

- Brisbane, G. (2002), "Dynamic warning signs act as Signs of rain", A. Vasiliou, VAISALA News, p31-32.
- Delanne, Y. et Violette, E (2001), "Wet road accidents – Driver behavior, Safety margins and road design", Traffic Safety on 3 continents conference, Moscow.
- Dupre, G et Floris, O (1997), « Signalisation des virages - Recueil et analyse de la signalisation implantée », projet SARI/RADARR, CETE Normandie Centre.
- Instruction Inter ministérielle de Signalisation Routière, 9ième partie, novembre 2008
- Gothié, M. (2007a), « Choix des sites expérimentaux », livrable 1.3, IRCAD.
- Gothié, M. (2007b), « État de mouillage critique », livrable 3.2, IRCAD.
- Note SETRA (2002), « Comment signaler les virages? », SETRA.
- Lamm, R. et al (1990), "Comparison of Operating Speed on Dry and Wet Pavement of Two Lane Rural Highways", Transportation Research Record, n° 1280, p 199–207.
- Michel E.-M. et al (2005), « Les pertes de contrôle en courbe, cinématique, typologie, caractéristiques des lieux, analyse d'un échantillon de 84 cas », rapport INRETS 262, 101 p.
- Shaw, M. et al (2000), "Some innovations in rural road safety", Highways &Transportation [Institution of Highways & Traffic] n°*47*, p 15-18, may 2000
- Violette, E. et Al (2001), « Accidents Par Temps de Pluie, Comportement des usagers : Les attitudes liées à la conduite par temps de pluie, étude psychosociale qualitative et quantitative », CETE Normandie Centre, Université de Rouen.
- Violette, E. et Al (2002), « Accidents Par Temps de Pluie, Comportement des usagers : Virages sur route bi-directionnelle, RD928, RD982, RN13 », CETE Normandie Centre.
- Violette, E. et al (2009a), « Mise en place et suivi des systèmes d'information : choix des sites », livrable 3.3.1, IRCAD.
- Violette, E. et al (2009b), « Mise en place et suivi des systèmes d'information : Système de contrôle/commande », livrable 3.3.3, IRCAD.

PROJET DE SIGNALISATION DYNAMIQUE DES ARRETS DE CARS (SIDYAC)

C. VACQUIER-BIGOT
Conseil Général d'Ille et Vilaine
Direction de la Gestion des Routes Départementales
Rennes, France

R. DIK
CETE de l'Ouest
Division Exploitation et Sécurité
Nantes, France

X. BERTRAND
CETE de l'Ouest
Centre d'Études et de Conception de Prototypes
Angers, France

Résumé

Le dispositif SIDYAC correspond à un prototype de déclenchement de signalisation dynamique aux arrêts de cars réalisé par le CETE de l'Ouest dans le cadre d'un marché passé avec le Conseil Général d'Ille et Vilaine (maître d'ouvrage de l'opération). L'objectif du projet est de sécuriser les arrêts de car en améliorant l'information des usagers, automobilistes et utilisateurs du transport, par une signalisation dynamique. La solution proposée, basée sur un équipement de la route, consiste à détecter les cars en approche de l'arrêt, autorisés à s'y arrêter, et à déclencher automatiquement, grâce à la technologie RFID, une signalisation lumineuse spécifique pour avertir les automobilistes de la présence d'un car à l'arrêt et donc potentiellement d'enfants afin de les inciter à adapter leur comportement et à réduire leur vitesse. Le projet comprend une phase expérimentale qui sera complètement évaluée (Avant/Après et Quantitative/Qualitative) avant d'envisager un déploiement à plus grande échelle.

Mots-clés: Sécurité routière, arrêts de cars scolaires, signalisation dynamique, détection, évaluation, vitesse.

Abstract

SIDYAC is a protocol for dynamic light signaling of bus stops. It was developed by CETE de l'Ouest and funded by Conseil General d'Ille et Vilaine. This project aims at improving traffic safety around bus stop by providing pedestrians, motorists and public transport users with real time information through dynamic light signaling. In fact, the system relies on a detector that is located on the road and monitors the approach of registered school bus. When a school bus nears the bus stop, the system autocratically triggers a light signals that informs car drivers that a school bus is coming and that children are likely to step in and out. This signal is to have car drivers adapt their behavior (and reduce their speed). The first part of the project will be experimental. It will provide data allowing a before-after evaluation of SIDYAC's efficiency, from both a quantitative and qualitative viewpoint. Depending on these results, a larger implementation will be considered in a second part.

Keywords: traffic safety, school bus stops, dynamic signaling, detection, evaluation, speed.

1. Contexte et objectifs de l'expérimentation

1.1 Présentation du contexte

Après avoir réalisé une étude de recensement des arrêts de cars potentiellement dangereux situés sur le réseau routier départemental, le département d'Ille et Vilaine a souhaité s'engager dans un projet innovant sur la sécurisation des arrêts de cars scolaires.

En effet, les accidents impliquant des enfants ont souvent des conséquences graves et ont toujours un impact fort au niveau des médias et sur la population. Même si ceux-ci restent fort heureusement peu fréquents dans ce département (le dernier accident recensé en Ille et Vilaine date néanmoins du 29 mai 2009 et a fait une victime, un adolescent de 14 ans), il faut veiller à ce que la sécurité soit maximale aux abords de ces arrêts.

Description des principaux problèmes de sécurité posés par les arrêts de cars

L'insécurité aux abords des arrêts de transports scolaires à fortement diminué ces dernières années. Fort heureusement, le nombre réel d'accidents est faible. Malheureusement, ils sont souvent très graves lorsqu'ils surviennent et particulièrement inacceptables compte tenu de l'âge des victimes.

La particularité de ces accidents est schématisée dans la figure 1 issue de l'étude de sécurité réalisée par le CETE Normandie Centre (2005) « Transports scolaires :la sécurité aux points d'arrêt, analyse accidentologique » qui visualise les types d'accidents les plus souvent observés et leur proportion. En premier lieu ce sont les accidents impliquant les usagers traversant à l'arrière du car et se faisant heurter par un véhicule qui arrive sur sa droite (type 6). Globalement, les accidents en lien direct avec les autres usagers de la voirie représentent 2 accidents sur 3 (types 5 à 8).

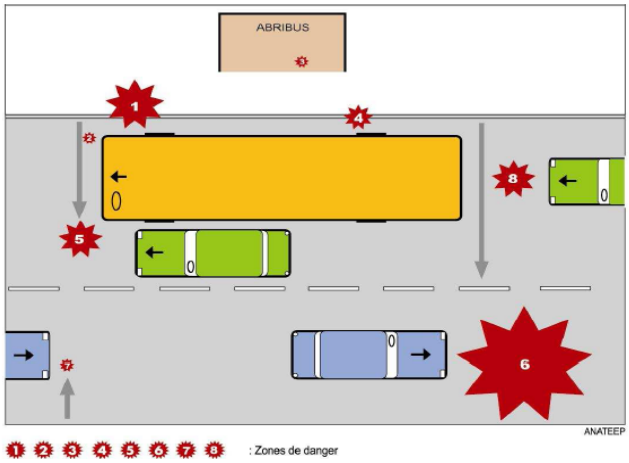


Figure 1 – Schématisation des principaux types d'accidents au droit d'un arrêt de car.

L'analyse des différents types d'accidents montre donc l'importance de prendre en compte les autres usagers pour que leur attention soit soutenue, par la signalisation dynamique dans la solution que nous étudions, mais aussi pour que leur comportement soit adapté à l'approche d'un arrêt (vigilance accrue et comportement apaisé sur la vitesse et les manœuvres de dépassement).

Les différents modes possibles d'intervention pour améliorer la sécurité d'un arrêt de car
Dans le cadre de la sécurisation des arrêts de car, tout dispositif qui a vocation à accentuer la vigilance des autres usagers de la voie pour les amener à adopter un comportement qui assure une sécurité absolue est une mesure qui renforce cette sécurisation. Néanmoins d'autres aspects nécessitent une attention qui, dans le cadre d'audit comme le préconise le guide du CERTU (2009) « Transport des scolaires (Le) : la sécurité aux points d'arrêts », aborde des points qui dépassent le seul aspect de l'alerte et de la vigilance.

La figure 2 extraite de ce guide illustre les points particuliers qui nécessitent une attention et une réflexion, à savoir :

- la localisation du point d'arrêt par rapport au réseau sur lequel il se situe et son environnement,
- la géométrie de l'arrêt, et en particulier sont implantation, en ou hors chaussée,
- les accès et cheminement pour rejoindre le point d'arrêt, et les traversées de voies,
- les équipements au point d'arrêts, qui intègrent autant les aires d'attente et d'embarquement que sa signalisation son éclairage, l'abri …

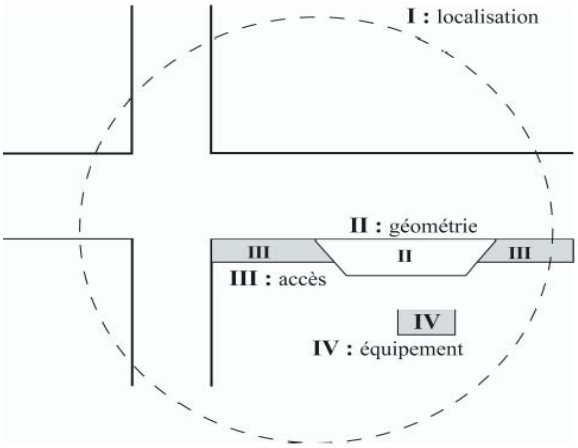


Figure 2 – Les différentes modalités d'intervention pour sécuriser un arrêt de car**.**

Compte tenu de l'analyse des principaux types d'accidents corporels, l'étude réalisée prend en compte l'intervention sur le seul volet « équipement » illustré par la figure 2, ici la signalisation, de la démarche de sécurisation d'un arrêt de car scolaire. Les autres volets de la démarche de sécurisation (localisation, géométrie, accès, cheminement) sont pris en charge par le Conseil Général d'Ille et Vilaine dans le cadre d'une démarche plus globale.

Le service des transports du Conseil général, chargé d'organiser le transport public routier non urbain de personnes ainsi que les circuits spécifiques pour le transport scolaire par cars, a en effet commencé par réaliser un état des lieux de l'ensemble des arrêts en établissant des fiches techniques recensant notamment les conditions de sécurité. Ce recensement a permis de mettre en évidence la dangerosité potentielle de certains arrêts et le besoin de définir des schémas type pour l'aménagement des arrêts de cars.

Après une réflexion concertée avec le service des routes départementales, des principes d'aménagement ont ainsi été définis en fonction des catégories de route. Chaque nouvel arrêt ou chaque arrêt réaménagé doit donc respecter ces principes. Pour cela, un budget spécifique est prévu chaque année pour l'amélioration des infrastructures des aires d'arrêt de cars.

Pour compléter les actions déjà menées et renforcer la sécurisation de ces arrêts, les élus départementaux ont souhaité s'engager dans une démarche innovante de signalisation dynamique, expérimentation faisant l'objet de cette présentation.

1.2 Objectifs de l'expérimentation de signalisation dynamique aux arrêts de cars

L'objectif de l'expérimentation est de sécuriser les arrêts de cars en améliorant l'infrastructure et l'information des usagers, automobilistes et utilisateurs du transport, par une signalisation dynamique lumineuse se déclenchant lorsqu'un car identifié se présente aux abords de l'arrêt. Le dispositif de détection des cars en mouvement à l'approche d'un arrêt de cars scolaires et de déclenchement de la signalisation dynamique adaptée doit pouvoir permettre de répondre à l'objectif de sécurisation des sites concernés en apaisant les comportements des autres usagers de la route grâce au déclenchement de la signalisation lumineuse.

L'étude du dispositif expérimental de signalisation dynamique a permis de retenir une solution qui consiste à détecter les cars en approche de l'arrêt, autorisés à s'y arrêter, et à déclencher automatiquement (pour une période fixe prédéfinie en fonction des sites) une signalisation lumineuse spécifique pour avertir les automobilistes (dans les 2 sens de circulation) de la présence d'un car à l'arrêt et donc potentiellement d'enfants afin de les inciter à adapter leur comportement et à réduire leur vitesse.

Les objectifs du dispositif de signalisation dynamique aux arrêts de cars sont donc:

- de sécuriser les arrêts de cars en améliorant l'infrastructure et l'information des usagers et de les inciter à adapter leur comportement et à réduire leur vitesse en présence d'un car aux abords de l'arrêt,
- de permettre la détection des cars en mouvement en amont des arrêts de car et aussi lorsqu'ils s'arrêtent effectivement aux arrêts afin d'embarquer/débarquer des passagers, sans intervention des conducteurs de car,
- de déclencher le dispositif de signalisation retenu, en cas de détection confirmée, et de le maintenir après le départ du car pendant une période dont la durée reste à déterminer pour sécuriser le site,
- d'atteindre un taux de fausse détection le plus faible possible,
- de pouvoir ultérieurement conduire un déploiement des équipements à grande échelle,

Les contraintes à prendre en considération découlant de ces objectifs sont :

- le recours à des technologies confirmées, le RFID (identification par radio fréquence) pour notre étude,
- la réduction au minimum de la consommation électrique du dispositif,
- la réduction de l'impact global du dispositif sur l'infrastructure,
- la limitation du coût des équipements,
- l'absence de commande manuel à enclencher par les conducteurs.

2. Principes de l'aménagement proposé

2.1 Les deux scénarios de signalisation dynamique envisagés

Suivant la configuration des sites, deux familles de scénarios de signalisation dynamique ont été envisagées :

- Scénario 1 : déclenchement de panneaux caisson lumineux de type A13a (danger présence d'enfants) complétés d'un panonceau « transport scolaire » pour attirer l'attention des usagers routiers sur la présence d'enfants.

- Scénario 2 : déclenchement de panneaux caisson lumineux de prescription de type B14 (limitation de vitesse) complétés d'un panonceau « arrêt de car ».

La figure 3 permet de schématiser le scénario 2 où le contrôle de présence d'un car grâce à l'identification par radio fréquence (RFID) permet de déclencher l'allumage des panneaux de signalisation dynamique (respectivement B14 et A13a pour le scénario 2 et le scénario 1). La partie 2.3 du rapport permet de décrire plus précisément les principes de détection du dispositif de signalisation dynamique.

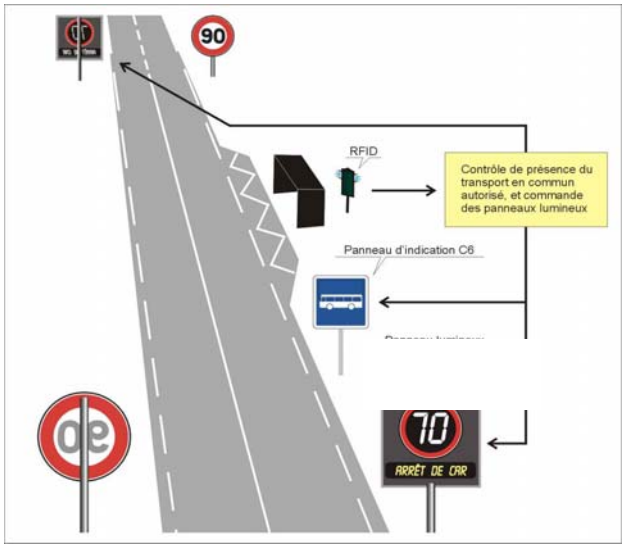


Figure 3 – Représentation schématique du scénario2.

Le scénario 2, représenté en figure 3, prévoit de mettre en œuvre une limitation dynamique de vitesse se déclenchant à l'approche d'un car à l'arrêt, autorisé à s'y arrêter, grâce au dispositif de détection et restant allumé peu de temps après le départ du car de l'arrêt. Ce scénario nécessite une autorisation d'expérimentation de la Délégation à la Sécurité et à la Circulation Routière (DSCR). La demande est en cours d'instruction conformément à « l'instruction interministérielle sur la signalisation routière (DSCR, 2008) ».

2.2 Les sites qui seront équipés du dispositif de signalisation dynamique

Le dispositif de détection des cars et de signalisation dynamique, dont le prototype a été validé en 2009, sera mis en œuvre à titre expérimental au cours du premier semestre de l'année 2010 sur 3 sites sélectionnés par le Conseil Général d'Ille et Vilaine qui ont déjà fait l'objet de la démarche de sécurisation globale décrite dans la partie 1.2. Ils sont décrits ci-après.

Il faut noter que la mise en place de ce dispositif sera accompagnée par une campagne de communication pour informer les usagers et la population en général de la démarche engagée et en particulier des rappels du code de la route sur les comportements à adopter aux abords des arrêts de cars.

Arrêt de car de La Gaudinais en Louvigné de Bais sur la RD 777

La RD 777 classée en catégorie B dans le règlement de voirie départementale (comprenant 4 catégories) supporte un trafic d'environ 4600 véh/jour. Cet arrêt de car (Figure 4) est situé hors agglomération. La vitesse est limitée à 90 km/h. Le nombre d'élèves concernés par cet arrêt est de 16. En période scolaire, l'arrêt bilatéral est desservi 23 fois par jour (cumulés dans les deux sens).

Figure 4 – L'arrêt de car de la Gaudinais**.**

Sur ce tronçon de route, la vitesse réglementaire est limitée à 90 km/h. Il est proposé d'abaisser cette limitation à 70 km/h à partir du moment où un car est détecté conformément aux principes du scénario 2. Ce panneau de limitation (panneau caisson lumineux) sera accompagné d'un panonceau avec la mention «arrêt de car ». L'objectif est d'attirer l'attention des automobilistes et de les obliger à réduire leur vitesse grâce à cette régulation dynamique des limitations de vitesses.

La configuration géométrique de la RD777 à proximité de l'arrêt Gaudinais avec un angle saillant à proximité entraînant une perte de visibilité du tracé rend crédible cette réduction des vitesses pratiquées lors de la présence d'un car à l'arrêt. C'est pourquoi cette limitation dynamique des vitesses a été proposée sous réserve d'obtenir l'accord de la DSCR (demande en cours d'instruction).

Arrêt de car de Brégeonjeotte en Dingé sur la RD 82

La RD 82 est classée en catégorie C dans le règlement de voirie départementale. Cet arrêt de car situé hors agglomération sur cette section de RD en alignement droit, avec des possibilités de dépassement, qui supporte un trafic d'environ 1300 véh/j. La vitesse est limitée à 90 km/h. Le nombre d'élèves concernés par cet arrêt est de 18. Ce site est caractérisé par un trafic faible circulant sur la RD mais par un nombre important d'élèves à transporter. En période scolaire, l'arrêt bilatéral est desservi 18 fois par jour (cumulés dans les deux sens).

L'analyse de site et du trafic circulant dans le secteur ainsi que de la configuration des lieux nous ont amené à retenir le scénario 1 pour ce site avec les panneaux caisson lumineux de type A13a « présence d'enfants » complétés d'un panonceau « transport scolaire ». La configuration des lieux et les visibilités importantes ne permettent pas de proposer une interdiction de dépasser qui ne serait pas crédible, ni une limitation dynamique des vitesses pour les mêmes raisons. Le scénario 1 envisagé devrait néanmoins permettre d'éveiller l'attention de l'usager et d'apaiser les comportements. L'évaluation présentée dans la partie 4 permettra d'évaluer l'impact de ce dispositif sur cet aspect.

Arrêt de car de La Renaudière en Romagné sur la RD 155

La RD 155 classée en catégorie C dans le règlement de voirie départementale supporte un trafic de 10608 véh/jour. Cet arrêt de car, hors agglomération, est situé dans une section limitée à 70 km/h, caractérisée par un trafic important. Le nombre d'élèves concernés par cet arrêt est de 4. En période scolaire, l'arrêt est desservi 3 fois par jour.

L'analyse de site et du trafic circulant dans le secteur ainsi que de la configuration des lieux nous ont amené à retenir le scénario 1 pour ce site avec les panneaux caisson lumineux de type A13a « présence d'enfants » complétés d'un panonceau « transport scolaire ».

2.3 Description de la solution technique retenue pour détecter les cars et déclencher la signalisation dynamique

Le dispositif de détection retenu pour mettre en œuvre ce projet repose sur la technologie RFID (identification par radio fréquence). Chaque car amené à s'arrêter à l'arrêt en question est équipé d'un tag RFID représenté sur la figure 5 et identifié par un numéro unique correspondant à un trajet récurrent. La portée de détection du dispositif (tag émetteur utilisé conjointement à une antenne réceptrice implanté sur site) est comprise entre 40 m et 80 m.

Figure 5 – Illustration d'un tag RFID (80mm x 34mm x 28mm).

Lorsqu'un car est détecté par la première antenne RFID directrice, positionnée à environ 150 m en amont de l'arrêt (sur le mât du panneau de prescription à caisson lumineux), la lecture de son numéro d'identification RFID permet de déterminer s'il dessert l'arrêt équipé :

- si le car ne dessert pas l'arrêt, rien ne se produit,
- si le car dessert l'arrêt, l'analyse de l'évolution du signal émis par le car permet de confirmer son approche de l'arrêt. Le système de traitement déclenche alors les dispositifs de signalisation dynamique connectés (panneaux caisson lumineux en amont de l'arrêt dans les 2 sens de circulation) afin d'avertir au plus tôt les autres usagers.

Lorsque le car en approche est détecté par la seconde antenne RFID omnidirectionnelle, située au niveau de l'arrêt, l'analyse de l'évolution du signal émis par le car permet de déterminer s'il marque l'arrêt ou non :

- si le car ne s'arrête pas à l'arrêt, la signalisation dynamique en amont de l'arrêt est désactivée aussitôt pour ne plus alerter les autres usagers,
- si le car confirme son arrêt, la signalisation dynamique est maintenue en amont. Le dispositif conçu permet également de déclencher un signal (lumineux ou autre) au niveau de l'arrêt si nécessaire pour renforcer l'indication de confirmation de l'arrêt.

Lorsque le car quitte l'arrêt, l'analyse de l'évolution du signal émis par le car permet de le confirmer. A ce moment, toutes les signalisations dynamiques sont désactivées après un délai de sécurité correspondant à la durée nécessaire à la montée/descente des voyageurs et leur traversée éventuelle après le départ du car (temps paramétré au niveau du dispositif et prédéfini en fonction de la configuration des sites).

Le dispositif expérimental ainsi décrit a fait l'objet d'un prototype conçu en 2009 par le centre d'études et de conception de prototypes du CETE de l'Ouest et qui a permis de répondre à l'ensemble des objectifs fixés au système de détection. Il a fait l'objet d'essais « usines » concluants et a pu être présenté aux élus du Conseil Général d'Ille et Vilaine à l'occasion d'une présentation en configuration réelle, sur site sécurisé, avec un car équipé qui a permis de tester différents scénarios de fonctionnement.

Le caractère innovant lié notamment au déclenchement d'une signalisation dynamique, dont la régulation des vitesses, en fonction d'un évènement donné, indépendant de l'usager et lui transmettant une information (la détection d'un car scolaire en amont de l'arrêt desservi, caractérisant ici le risque lié aux mouvements d'usagers piétons au droit de l'arrêt de car) a été très apprécié par les élus de cette collectivité.

Le coût du dispositif
Le coût d'équipement complet d'un arrêt de car est estimé entre 25 000 et 40 000 euros HT en fonction notamment de la configuration des lieux et de la nature des tranchées à réaliser (présence ou pas de réservation, tranchées traditionnelles ou par fonçage,...).

Le schéma type du Conseil Général pour l'aménagement d'un arrêt de car scolaire prévoira des réservations pour tranchées, ce qui devrait permettre de limiter le coût du dispositif à sa borne inférieure. A noter que le coût d'équipement des véhicules est très faible puisque les TAG à positionner dans les cars sont évalués à 30 euros HT, ce qui permet plus de souplesse dans la gestion du parc de véhicules à équiper pour un arrêt donné.

3. Les effets attendus

Les arrêts de car ne sont aujourd'hui signalés qu'en position avec le panneau de type C6. Ce panneau permanent ne permet pas à l'automobiliste de savoir si des piétons, et plus particulièrement des enfants, se trouvent aux abords de la route. Le déclenchement d'une signalisation lumineuse permettra d'attirer l'attention des automobilistes, dans les 2 sens de circulation, sur le fait qu'un car va bientôt s'arrêter et que des piétons sont susceptibles de traverser la chaussée. La limitation de vitesse ou la signalisation de danger « présence d'enfants » obligera les usagers à adapter leur comportement (attention accrue) et limitera les risques d'accident.

L'ajout du panonceau « arrêt de car » ou « transport scolaire » en fonction du scénario, et le déclenchement de la signalisation lumineuse en présence effective d'un car pouvant desservir l'arrêt renforceront la crédibilité de la signalisation à l'usager. La campagne de communication qui accompagnera la mise en place de ce dispositif jouera également un rôle important. Les effets attendus du dispositif seront évalués conformément aux dispositions prévues dans la partie 4 du présent rapport.

Cas particuliers des cars desservant l'arrêt mais ne s'y arrêtant pas en l'absence de demande spécifique des voyageurs
La signalisation lumineuse se déclenche lorsqu'un car desservant l'arrêt, et identifié par une liste prédéfinie, se présente au niveau des panneaux amont comme représenté dans la figure 6, même si le car ne s'arrête pas à l'arrêt en l'absence de demande spécifique des voyageurs ou de piéton à l'arrêt. Cette situation particulière peut en effet présenter des risques dans la mesure où :

- le chauffeur du car adopte un comportement adapté (réduction de la vitesse, observation de l'arrêt) pour se préparer à l'arrêt si nécessaire,
- des piétons peuvent être amenés à des comportements à risques en observant le car s'approcher pour rejoindre rapidement, en cas de retard, l'arrêt de car (traversées dangereuses notamment). Ce type de situation peut-être observé notamment en hiver lorsque des enfants attendent l'arrivée du car dans la voiture des parents par exemple. Un accident de ce type a aussi été recensé dernièrement.

Le déclenchement de la régulation dynamique de vitesse à 70 km/h dès le passage du car au niveau des panneaux amont doit pouvoir permettre de limiter ce risque en apaisant les

comportements des autres usagers dont la vigilance sera accrue. Bien sûr, et comme indiqué dans la partie 2.3, si le car ne s'arrête pas à l'arrêt, la signalisation dynamique en amont de l'arrêt est désactivée aussitôt pour ne plus alerter les autres usagers, ce qui renforcera également la crédibilité du signal donné.

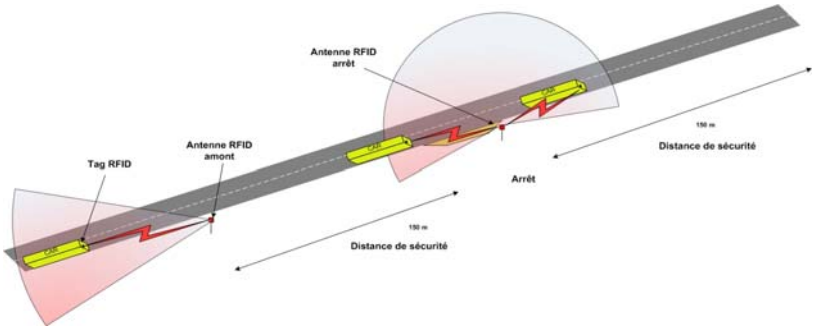


Figure 6 – Principes de détection amont et au niveau de l'arrêt

4. Procédure d'évaluation de l'impact du dispositif sur le comportement des usagers

L'évaluation des dispositifs de signalisation dynamique mis en place sur les 3 sites tests sera réalisée par le CETE de l'Ouest et comportera :

- une évaluation quantitative basée sur des mesures de vitesse.
- une évaluation qualitative basée sur des enregistrements vidéo pour le site de la Gaudinais et des analyses terrain de fonctionnement pour les 3 sites.

L'évaluation comportera également une vérification du fonctionnement des dispositifs qui seront implantés sur sites avec une méthodologie analogue à celle qui avait de permis de valider le fonctionnement du prototype lors des essais usines menés en 2009.

Le volet quantitatif de l'évaluation

Le volet quantitatif de l'évaluation consistera à mettre en œuvre une comparaison « avant/après » des vitesses des usagers en présence d'un car à l'arrêt. Ce volet nécessite un état 0 pour bien mesurer l'efficacité du dispositif. Les vitesses seront mesurées sur les sites tests sur 5 points de mesures dans les deux sens de circulation (au droit de l'arrêt, à 150m et à 300m de part et d'autre de celui-ci). Ces mesures seront réalisées pendant deux semaines complètes en comptage individuel dans des conditions météorologiques normales (pas d'influence sur le comportement des usagers) et hors période de vacance scolaire. Les résultats des deux périodes de mesures (avant et après installation) seront ensuite comparées au moyen d'indicateurs simples (V85, % de véhicules par classe de vitesse).

Le volet quantitatif de l'évaluation en comparaison avant/après comprend un état 0 réalisé avant la mise en œuvre du dispositif et un état 1 qui sera mesuré environ 1 mois après la mise en œuvre du dispositif. Afin de quantifier la persistance dans le temps des effets qui seront mesurés, un état 2 sera réalisé dans les mêmes conditions environ 6 mois après la mise en œuvre du dispositif.

L'analyse des mesures réalisées dans les différents états comprendra une analyse contextuelle en rapprochant les résultats avec les caractéristiques géométriques de l'infrastructure, l'importance des mouvements tournants aux carrefours situés à proximité, la nature du trafic (présence ou pas d'engins agricoles) mais aussi en comparant les résultats en fonction de la luminosité (impact jour/nuit).

Le volet qualitatif de l'évaluation
Le volet qualitatif de l'évaluation consistera à mener une analyse comportementale des usagers de la route en présence d'un car à l'arrêt et après équipement avec signalisation dynamique par l'intermédiaire d'enregistrements vidéos et d'observation in situ. Les enregistrements vidéos seront effectués sur un nombre significatif de phases lors desquelles les cars marquent l'arrêt (3 à 5 phases par site) et durant les périodes de mesures automatiques des vitesses. Ils permettront d'analyser les comportements des piétons et des conducteurs et éventuellement d'identifier les événements pouvant interférer dans les résultats.

Le volet qualitatif sera complété par une enquête à mener auprès des chauffeurs des cars pour évaluer l'apport du dispositif dans la sécurité des dessertes. Une enquête auprès d'usagers pourrait être envisagée le cas échéant mais elle semble plus difficile à mette en œuvre.

Phasage de l'évaluation
L'évaluation technique consistera à mesurer l'impact du dispositif grâce à une comparaison de type avant/après installation des panneaux avec également une observation de la persistance éventuelle des effets grâce à la mise en œuvre de deux campagnes de mesures après équipement. Cette procédure sera mise en œuvre de manière équivalente sur les 3 sites étudiés.

L'évaluation comportementale (qualitative) permettra de mieux apprécier les effets du dispositif grâce à des observations (in situ et vidéos) pendant les campagnes de mesures de l'évaluation technique et après installation des dispositifs. Elle permettra de mieux interpréter les résultats mais aussi d'alimenter la comparaison des deux scénarios mis en œuvre.

Exploitation des résultats
L'exploitation des résultats comportera notamment une comparaison de l'impact des deux scénarios qui seront expérimentés entre la signalisation de danger et la régulation dynamique des vitesses. Les résultats de l'évaluation seront transmis à la DSCR pour juger de l'intérêt de l'expérimentation de la régulation dynamique des vitesses, au sens de l'instruction interministérielle sur la signalisation routière, et des suites à donner à cette expérimentation avec notamment les conditions à respecter pour un éventuel déploiement de ce dispositif, si les résultats s'avéraient concluant, sur d'autres sites à configuration singulière nécessitant de prendre des mesures particulières pour les sécuriser.

Le Conseil Général d'Ille et Vilaine définira également une politique de déploiement du dispositif à une plus grande échelle pour équiper notamment les arrêts de cars les plus sensibles.

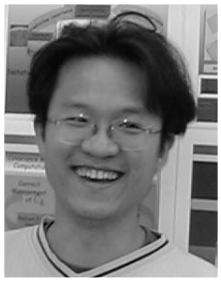
Références

- CETE Normandie Centre (2005), « Transports scolaires :la sécurité aux points d'arrêt, analyse accidentologique ».
- CERTU (2009), « Transport des scolaires (Le) : la sécurité aux points d'arrêts ».
- DSCR (2008) « Instruction Interministérielle sur la Sécurité Routière », 2ème partie et 4ème partie.
- CETE Sud Ouest, ZELT (2003), « Théorie de l'évaluation », rapport méthodologique ».

TRAJECTOGRAPHIE SUBMETRIQUE PAR COUPLAGE DGPS, CARTE PRECISE DES MARQUAGES ET VISION

David BÉTAILLE
Division Métrologie et Instrumentation (DMI)
(géo-localisation)

Philippe NICOLLE
Division Métrologie et Instrumentation (DMI)
(traitement d'images)



Sio-Song IENG
Laboratoire d'Exploitation, Perception, Simulateurs et Simulations (LEPSIS)

Résumé

Cet article présente une méthode de trajectographie locale de véhicule à partir de mesures internes : odomètre et gyromètre (pour la localisation à l'estime), et GPS différentiel et vision (pour corriger la dérive). Les limites de l'utilisation de la phase en GPS cinématique mono-fréquence sont montrées, et la complémentarité des images, dont le traitement permet une estimation décimétrique du positionnement latéral par rapport aux marquages cartographiés.

Mots-clés : GPS, traitement d'images, fusion de données, localisation de véhicule, détection du marquage routier, cartographie précise.

Abstract

This article presents a method for local vehicle trajectory estimation using on-board sensors: odometer and gyroscope (for dead-reckoning), and differential GPS and camera vision (for drift correction). The limitation of single-frequency post-processed kinematic GPS is shown, and images are proven to offer an alternative for lateral positioning with respect to road marking stored in a map.

Keywords: GPS, image processing, data fusion, vehicle positioning, road marking detection, precise mapping.

1. Introduction

La métrologie des trajectoires, lorsqu'elle s'applique à une flotte de véhicules, ne peut (pour des raisons évidentes de coût) exploiter des solutions d'instrumentation telles que celles mises en œuvre dans les seuls véhicules de laboratoire. En effet, le GPS cinématique n'est possible qu'avec des récepteurs sophistiqués, et les centrales inertielles comme la LandINS du VERT (Véhicule d'Etude et de Référence des Trajectoires) sont 100 fois plus coûteuses que les standards automobiles en termes de capteurs de navigation à l'estime… Par contre, quand on instrumente une flotte, le GPS standard, ou DGPS Egnos, et les instruments disponibles à bord comme l'odomètre et le gyromètre (de série sur ABS et ESP) peuvent suffire pour trajectographier à quelques mètres près. Par exemple en métrologie du trafic par véhicules sondes, telle DynaMIT à Vienne (Antoniou et al., 2006), le GPS standard convient.

Or, dans les usages liés à la sécurité routière, on s'intéresse au passage des véhicules en un aménagement particulier, et non à la totalité des routes circulées, ce qui peut donner lieu à la mise en oeuvre d'instruments en bord de voie comme des caméras (Goyat et al., 2006). D'un autre point de vue (celui du véhicule), les marquages routiers peuvent avoir été relevés avec précision, de sorte que le traitement d'images prises depuis une flotte équipée, par couplage avec d'autres instruments à bord (notamment GPS) permette une trajectographie submétrique.

Les travaux rapportés dans cet article concernent d'une part le couplage DGPS, odomètre et gyromètre, et d'autre part l'introduction de mesures de l'écart latéral au marquage par un système de vision, cet écart étant associé à une carte précise. L'expérimentation sur le nouveau virage de la piste de référence du LCPC montre, là où la vision est disponible, une amélioration sensible de la précision. Après avoir présenté le véhicule instrumenté et le site expérimental, on montre en première partie, les limites du traitement cinématique de mesures de phases GPS mono-fréquence. En deuxième partie, les images sont exploitées et donnent une mesure de l'écart latéral, laquelle est fusionnée avec l'ensemble des autres mesures (GPS mais aussi odomètre et gyromètre) en troisième et dernière partie.

Les traitements sont faits en temps différé, l'étude n'ayant pas (dans le programme de recherche MTT) de finalité temps réel. Les techniques mises en œuvre sont classiques, tant en traitement d'images qu'en fusion des données, mais la contribution est originale dans les métiers de la route et la sécurité routière, en particulier pour l'étude de l'impact des aménagements sur la trajectoire des usagers. Dans le contexte de la robotique, donc du temps réel, le lecteur trouvera des développements proches, où la caméra et le scanner laser sont couplés, par exemple (Schubert et al., 2009) pour constituer une carte locale dynamique.

2. Présentation de l'instrumentation du véhicule et du site expérimental

Cette section présente les capteurs à bord du véhicule utilisé pour l'étude, ainsi que la cartographie précise réalisée sur le site d'essais.

2.1 Instrumentation du véhicule

Les capteurs embarqués sont l'ensemble des capteurs d'un MITL/G (moyen interne de trajectographie locale/globale), incluant d'une part ceux liés aux actions du conducteur (volant, pédales) et d'autre part les instruments suivants :

- récepteur GPS Ashtech AC 12 (mono-fréquence 1Hz) connecté à une antenne patch,
- gyromètre vertical à fibre optique KVH RD 2100 (100Hz),

- centrale inertielle MEMS MicroStrain 3DMG (76Hz, non utilisée pour cette étude),
- odomètres (à l'arrière, gauche et droite, 40 impulsions pour 1,71m de périmètre roue),
- caméra frontale Marlin (1 image tous les 5m) ;

avec en plus, pour établir une "vérité terrain" (en rouge figures 7, 10 et 11), la centrale inertielle LandINS couplée à un second récepteur GPS mobile (Thalès Scorpio). Enfin, un dernier récepteur GPS (Thalès Scorpio), en base fixe, est stationné à proximité du site de test, pour permettre le post-traitement en GPS cinématique. Ces récepteurs sont bi-fréquence.

Tous les capteurs (sauf la LandINS) sont connectés à un DIRCO dont la fonction est l'horodatage et l'enregistrement des données fournies (trames numériques, impulsions, images…). Le récepteur AC 12 fournit au DIRCO un PPS (pulse par seconde UTC) qui permet de passer les données horodatées par le DIRCO en temps UTC, afin de fusionner ces données sur une base de temps unique pour le calcul de trajectoire, puis comparer cette trajectoire à la référence LandINS synchrone.

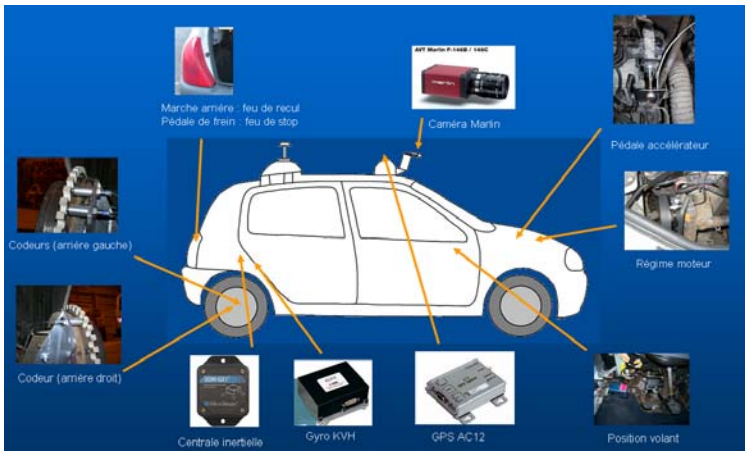


Figure 1 – Capteurs embarqués

2.2 Cartographie

Le propos n'est pas de généraliser à l'ensemble des routes un modèle géométrique précis, mais d'en limiter l'usage aux seules sections visées par des études d'impact d'aménagement routier. Quand on ne dispose pas des plans de récolement de ces sections permettant a priori le positionnement des marquages, un relevé topographique spécifique est nécessaire. Celui-ci peut être effectué manuellement, par levé de points en GPS "stop and go" pris directement sur le marquage, soit "au vol" en circulant à bord d'un véhicule géo-référencé par GPS cinématique (éventuellement couplé à une centrale inertielle), et équipé d'un système de vision permettant en post-traitement l'extraction des marquages et leur positionnement relatif à la caméra embarquée. Sur le principe, que nous exposerons brièvement plus loin, une telle technique dite de "mobile mapping" est dans ses grandes lignes similaire à celle que nous avons mise en œuvre pour cette étude. Cependant, les fournisseurs de nouvelles données cartographiques tels l'IGN (Tournaire et al., 2006) déploient généralement des dispositifs à plusieurs caméras et à plans laser tournant, et disposent aussi d'ortho-images aériennes de haute définition, utilisables complémentairement dans des processus sensiblement plus complexes que celui que nous nous proposons de présenter. On notera que les futures bases de données cartographiques, notamment en urbain, prévoient de renseigner les marquages.

Le marquage de la partie de la piste de référence du LCPC (virage RADARR) sur laquelle nous avons évolué a été relevé manuellement, à raison d'un point à chaque extrémité de trait ici discontinu, représentant donc des intervalles entre points de 1.5 et 3m. Cette résolution spatiale, ainsi que l'exactitude du positionnement (celui-ci a été fait par GPS cinématique "stop and go" entre le récepteur mobile et la station de base géo-référencée du LCPC distante de moins d'un kilomètre), nous fournissent toutes garanties quant à la précision de notre carte tant en relatif (respect de la forme du virage) qu'en absolu (rattachement à une station du Réseau GPS Permanent).

Afin de densifier la carte, nous avons procédé par filtrage de Kalman à un ajustement de clothoïdes sur les points relevés (Bétaille et al., 2008). Une fois les paramètres des clothoïdes calculées, elles peuvent être discrétisées spatialement aussi finement que de besoin. La figure 7 montre (en partie) la série de clothoïdes ajustées au marquage central du virage RADDAR.

3. Positionnement par GPS seul

Le récepteur GPS AC 12 donne un positionnement autonome standard, que l'on peut améliorer en différentiel (DGPS) ou encore en cinématique, par traitement de la phase disponible sur une seule porteuse pour cet appareil. Le logiciel GNSS Solutions, de Thalès Navigation – Magellan (*www.magellan-gps.cz/images/gps/geodet/survey/software.html*) a d'abord été choisi : ici il est utilisé avec les mesures AC 12 pour calculer la localisation par GPS cinématique en mono-fréquence relativement à la station de référence GPS sur zone. On note qu'il est aussi utilisé avec les mesures GPS bi-fréquence du MRT.

Ce logiciel, qui est assez fermé, ne permet pas d'alternative à un post-traitement standard, typiquement de mesures GPS bi-fréquence. Or ici, en mono-fréquence, les résultats de calcul n'étant pas satisfaisant, on a cherché à moduler les paramètres de post-traitement. Pour ce faire, le logiciel Waypoint, de Novatel (*www.novatel.com/products/waypoint_pps.htm*), a aussi été utilisé et a permis de mieux comprendre quelles sont les causes des résultats obtenus, et les limites des traitements.

3.1 Principe résumé du GPS cinématique

Le GPS cinématique, en post-traitement comme en temps réel, consiste à calculer un vecteur entre une base fixe et un récepteur GPS mobile, à partir de mesures de distances aux satellites. Il faut noter que ce n'est pas tant la distance récepteur-satellite qui importe mais la différence de distance (figure 2) pour un satellite donné à deux récepteurs relativement proches (quelques dizaines de kilomètres tout au plus) et supposés parfaitement synchronisés. En pratique cette synchronisation n'existe pas, et des doubles différences sont faites, c'est-à-dire des différences par récepteurs et par paires de satellites, ces paires incluant toutes un satellite commun dit satellite "pivot".

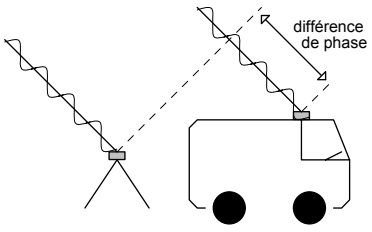


Figure 2 – Principe de mesure de différence de phase entre base et mobile

Les récepteurs mesurent la phase, c'est-à-dire qu'ils apprécient (en général à chaque seconde) de combien la distance les séparant des satellites a varié en nombre de cycles de phase entiers, plus une partie fractionnaire de cycle. Le problème connu sous le nom de "fixation d'ambiguïtés" consiste à estimer le nombre de cycles de phase entiers composant la différence de distance récepteurs satellite à l'instant (le même pour nos récepteurs synchronisés) où ceux-ci ont commencé leurs mesures. Les ambiguïtés entières sont des inconnues du problème

de localisation par mesures de phase, car, pour résumer, les phases sont connues à 2π près. Contrairement à la position du mobile, elles ne changent pas dans le temps, sauf masquage et réinitialisation des mesures. Les différents algorithmes de fixation des ambiguïtés considèrent d'abord celles-ci comme des réels : on parle alors d'ambiguïtés flottantes. Puis, avec le temps et la redondance des mesures, ces quantités convergent vers des entiers, ou ambiguïtés fixées. La vitesse de convergence et les paramètres des tests sont très différents en mono et en bi-fréquence.

3.2 Résultats

Plusieurs tests ont été effectués dans des conditions expérimentales proches d'un observatoire de trajectoire. On rapport ici les meilleurs résultats obtenus, sur un test dont le scenario est le suivant : 7' à l'arrêt, puis 13' en mouvement (à moins de 50km/h), 5' à l'arrêt, puis 5' en mouvement, enfin 20s à l'arrêt. Le post-traitement avec GNSS Solutions de ce test ne s'est pas avéré concluant en termes de fixation d'ambiguïtés, comme en témoignent les figures 3 à 6 commentées ci-dessous. On y compare les résultats mono et bi-fréquence.

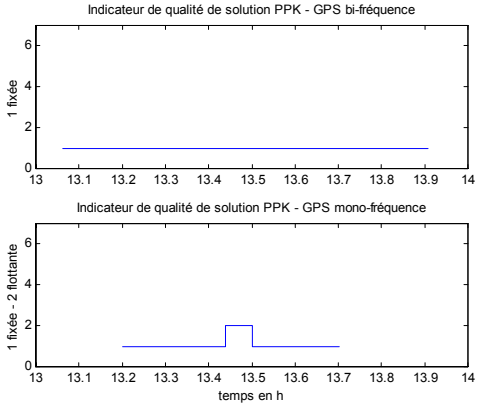


Figure 3 – Indicateur fixé/flottant : on note que les ambiguïtés sont fixées sauf sur une partie de l'essai (en mouvement)

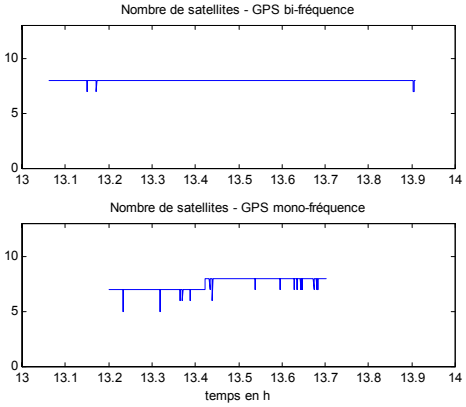


Figure 4 – Nombre de satellites, toujours supérieur pour le récepteur bi-fréquence dont l'antenne est meilleure

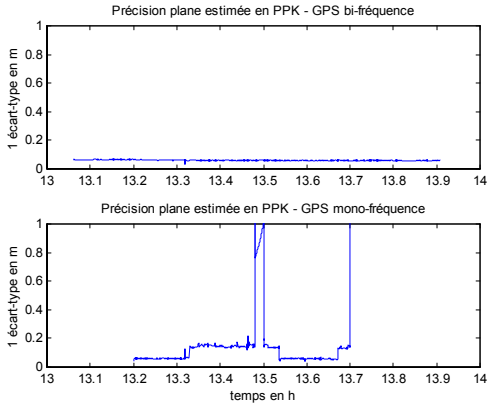


Figure 5 – Précision estimée : par la suite, on considère l'écart entre les solutions mono et bi-fréquence, cette dernière pouvant être considérée comme proche de la vérité terrain

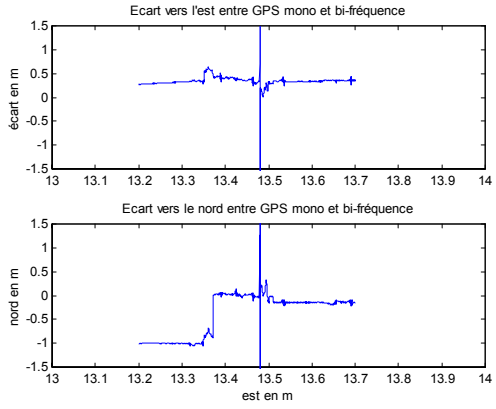


Figure 6 – Ecart de position : on constate sur la première partie de l'essai, où les ambiguïtés sont réputées fixées, que la position calculée montre un saut d'un mètre, parfaitement contradictoire aussi avec la précision estimée

La figure 7 montre clairement (en bleu) le saut de la solution mono-fréquence. L'algorithme GNSS Solutions ne fournit pas d'indicateur fiable de ce saut : il se produit en effet pendant une phase où les ambiguïtés sont réputées fixées et la précision estimée décimétrique !

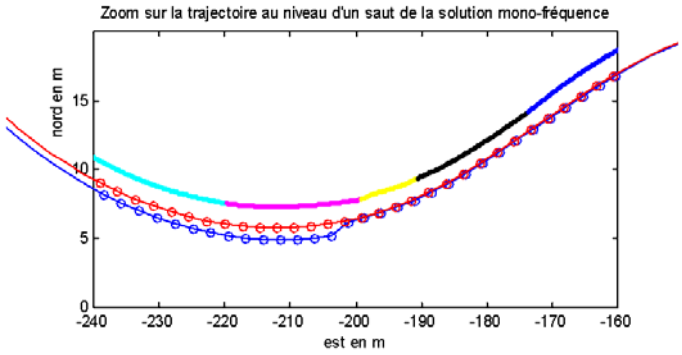


Figure 7 – Visualisation plane d'un saut de la trajectoire mono-fréquence

Waypoint est un logiciel de calcul GPS cinématique plus ouvert que GNSS Solutions. Nous avons forcé Waypoint à chercher d'abord une solution statique, qu'il a trouvée avec ambiguïtés entières fixées, puis, partant de là, continuer sur les solutions époque par époque. Il s'avère qu'avec le mouvement du récepteur, l'algorithme abandonne les ambiguïtés estimées en statique, car les mesures sont trop bruitées. Une analyse montre rapidement qu'il s'agit des mesures au niveau du récepteur mobile, et non celles au niveau de la base et l'antenne patch utilisée est mise en cause. Cependant, des essais complémentaires ont montré les mêmes limites (voire défauts) des algorithmes de calcul GPS cinématique mono-fréquence, et ce même avec une antenne de meilleure qualité, ou avec d'autres récepteurs de la même gamme. On ne dispose finalement dans notre contexte opérationnel que de solutions de navigation de précision métrique en mono-fréquence, ce qui est évidemment insuffisant au regard de l'exigence décimétrique recherchée pour le positionnement latéral.

4. Traitement des images

Le positionnement latéral d'un véhicule sur la voie de circulation n'est pas directement accessible et s'avère, à moindre coût, difficile à obtenir par GPS. Pour la conduite de véhicule, l'information visuelle est indispensable et il est donc judicieux d'utiliser des cameras pour étudier la trajectoire d'un véhicule. L'extraction des marquages routiers à partir des images acquises par des caméras embarquées constitue une réponse.

Les caméras peuvent être placées sur le coté du véhicule et viser le bas-côté. Une autre possibilité consiste à positionner la caméra sur le toit, diriger vers l'avant du véhicule. Bien que la précision soit moindre, nous avons préféré cette configuration afin de visualiser la scène et faciliter l'interprétation des données recueillies. On a aussi accès à la forme géométrique de la courbe de la route, la courbure, l'orientation…

La mesure de position latérale d'un véhicule par caméra consiste : 1 - en l'extraction des marquages ; 2 - en l'ajustement d'une courbe sur le marquage extrait ; 3 - en l'extrapolation de la courbe au niveau du véhicule et le calcul de l'écart latéral.

Les images sont acquises périodiquement, horodatées et associées aux données fournies par un GPS et un odomètre. Le système de prise de vues est calibré au préalable. La calibration est nécessaire à la fois pour l'extraction des marquages et le calcul de l'écart latéral au marquage axial. Il est effectué à partir d'une mire peinte au sol et du logiciel Calcam (Nicolle et Charbonnier, 2000). Chaque pixel de l'image peut être replacé dans un repère lié au véhicule situé dans le plan de la chaussée et inversement.

De multiples travaux ont porté sur l'extraction des marquages routiers et l'ajustement d'une courbe, parmi lesquels (Veit et al., 2008) et (Ieng et al., 2004) respectivement.

4.1 Extraction de la courbe

L'algorithme d'extraction utilise les caractéristiques photométriques et géométriques pour ne conserver que les pixels qui appartiennent aux marquages. Les pixels des marquages permettent ensuite l'ajustement d'une droite ou d'une courbe polynomiale. L'algorithme d'ajustement est fondé sur la théorie des M-estimateurs et les statistiques robustes. Les outils mathématiques employés nous permettent de mesurer qualitativement et quantitativement la robustesse de l'estimation de la courbe du marquage. La figure 8 illustre l'extraction des éléments de marquages en bleu, l'ajustement par une droite (ou parabole) en vert et de chaque coté de cette droite (ou parabole) l'incertitude de l'estimation en rouge. L'illustration montre que dans un virage, la droite d'ajustement ne passe pas parfaitement par la ligne des centres des marquages (l'incertitude est grande sur l'image de gauche, ce qui indique ici que le modèle de droite est très incertain). L'ajustement par une parabole donne un résultat plus satisfaisant, ce qui réduira également l'erreur produite sur le calcul de la position latérale. La valeur de confiance sur l'ajustement permettra également de déterminer un indicateur de confiance sur la mesure de position latérale.

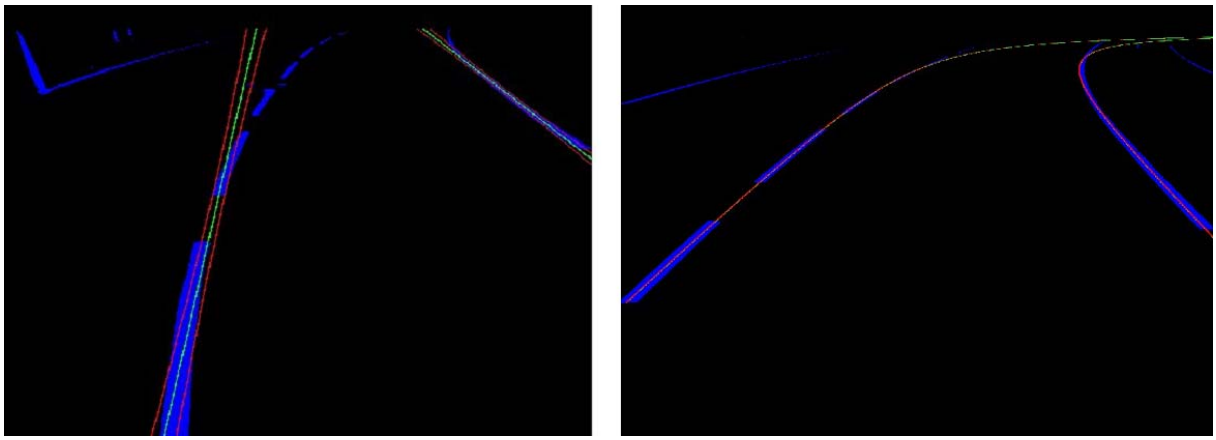


Figure 8 – Extraction et ajustement d'une droite ou d'une parabole sur les marquages

4.2 Calcul de la position latérale

Après cette première étape, nous pouvons procéder au calcul de la position latérale. On peut directement le calculer au niveau de bas de l'image, mais c'est négliger qu'un décalage longitudinal (fonction du piqué de la caméra) existe et doit être pris en compte. Il est donc nécessaire de ramener l'écart latéral jusqu'au niveau du véhicule, par une extrapolation de la courbe ou la droite des marquages. La position latérale est calculée sur une ligne perpendiculaire au marquage et passant à la verticale de la caméra. L'origine du repère véhicule dans le plan de la chaussée est positionnée sur cette verticale (figure 9). Nous avons développé deux méthodes que nous allons détailler maintenant.

Théorème de Thalès

La figure 9 montre un schéma du véhicule avec la caméra embarquée visant une zone de calibration ainsi que deux lignes de marquages avec une droite ajustée sur le marquage axial. La mesure de la position latérale peut être réalisée plus ou moins précisément suivant la position de la caméra, la courbure de la route, l'extrapolation réalisée. Nous proposons une méthode de calcul de la position et de l'erreur commise en fonction du rayon de courbure du virage et la distance du point de marquage le plus proche visible dans l'image.

Le principe consiste à extrapoler la position du marquage non visible par la caméra en prolongeant le segment de la droite ajustée jusqu'au point P0. Pour cela, nous recherchons deux points P1 et P2 visibles sur l'image, situés sur la courbe ou la droite d'ajustement des marquages. Nous calculons ensuite la position du point P et de ces deux points dans le repère du véhicule, puis au moyen de la relation de Thalès, nous déterminons la position du marquage en P0. L'abscisse de ce point donne la position latérale de la caméra.

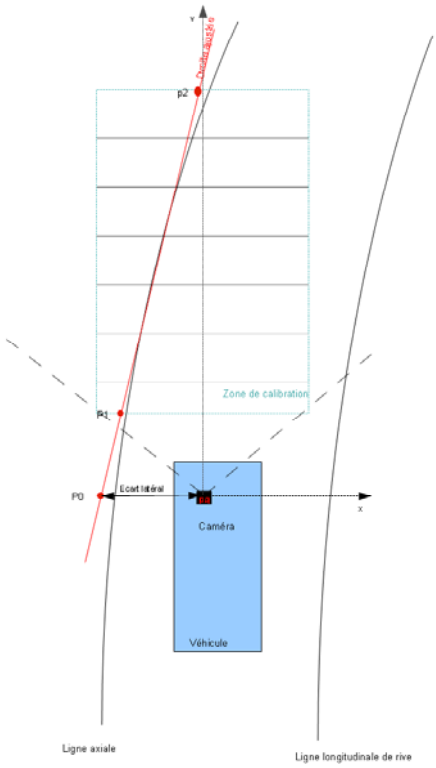


Figure 9 – Schéma des différents éléments pour le calcul de la position latérale du véhicule par application du théorème de Thalès

Sur un virage, l'extrapolation linéaire est simple mais on commet nécessairement une erreur. Cette erreur est croissante en fonction de l'éloignement des points et de la courbure de la route. Pour nos essais, nous avons choisi de régler l'angle de piqué de la caméra pour prendre l'image juste au dessus du capot du véhicule. Avec notre configuration, le bas de l'image se situe à 2,6m de la verticale de la caméra. Pour réduire cette erreur due à l'éloignement des points, nous parcourons l'image de bas en haut pour trouver le point P1 le plus bas dans l'image et nous recherchons P2 situé 3m plus loin dans la scène. De même, la droite qui contient P et qui intersecte la droite des points P1, P2 est décalée pour éviter d'avoir P en dehors de la zone de calibration en particulier lorsque l'on a une route en ligne droite

Extrapolation

Pour la seconde approche, nous calculons les coordonnées du repère véhicule [0,0] dans le repère image. Ces coordonnées $[x_0,y_0]$ trouvées se situent en dehors et en dessous de l'image. Puis, dans le repère image, nous extrapolons la courbe du marquage à la ligne y=0. Nous calculons ensuite la position de ce point [x,0] dans le repère du véhicule. Par la calibration de notre système de prise de vue, la distorsion de l'optique a été estimée mais très incertaine lorsque l'on réalise des calculs en dehors de l'image. Aussi l'ajustement est réalisé sur des images corrigées de la distorsion pour réduire l'erreur d'extrapolation.

Résultats
- en ligne droite, les résultats sont confondus et les différences entre les méthodes et avec la référence ne sont pas significatives ;
- les deux méthodes sont biaisées en virage (jusqu'à 0,3m d'erreur sur l'essai avec un rayon de courbure de 100m), surtout si on ajuste une droite (mais aussi une parabole) ; le biais repasse par zéro et change de signe aux inversions de courbure (figure 10, à t = 10 et 50s) ;
- la méthode par extrapolation apparaît meilleure que celle appliquant le théorème de Thalès.

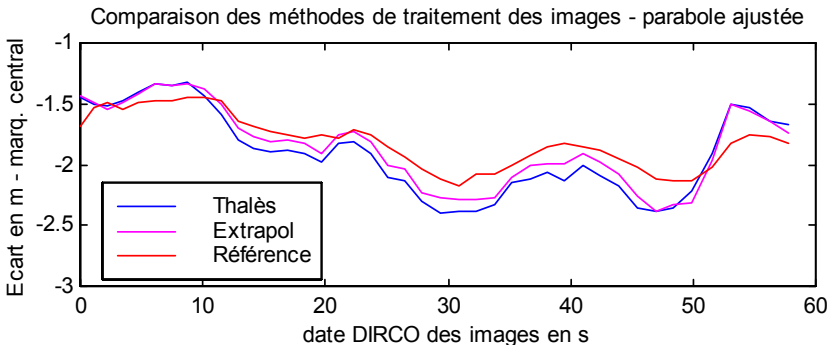


Figure 10 – Comparaison à la référence des deux méthodes de traitement des images

5. Fusion des données et conclusions

Les écarts latéraux obtenus par traitement d'images sont introduits (de même que des positions GPS) pour recaler un filtre de Kalman étendu dont le modèle d'évolution utilise l'odomètre et le gyromètre. Le logiciel Gyrolis (Bétaille, 2008) a été modifié, avec comme principaux paramètres : la précision des solutions flottantes en GPS cinématique mono-fréquence (0,5m) et la précision de mesure estimée par les méthodes présentées en section 4. Afin d'éviter que l'algorithme de couplage inertiel – GPS – images ne "bascule" entre des recalages GPS et des recalages par l'image relativement incohérents, qui conduirait à une allure en créneau de la solution hybride, on fait le choix sur la zone cartographiée du virage, de n'utiliser que les images, et plus aucune solution GPS.

La figure 11 montre, pour un essai représentatif, la trace du marquage central de référence, la trajectoire de référence MRT (en rouge) et les solutions GPS cinématique mono-fréquence (cercles roses). Ces dernières présentent un biais symptomatique de l'impossibilité pour les solveurs GPS cinématique utilisés de fixer les ambiguïtés de phase en mono-fréquence sur une fenêtre temporelle trop courte (moins de 10 minutes) et à cause de mesures de phase trop bruitées. On constate bien tout l'intérêt de recaler l'écart latéral par l'analyse des images.

En conclusion, la localisation par GPS mono-fréquence s'est avéré insuffisamment précise : ni GNSS Solutions, ni Waypoint n'ont convergé vers une solution optimale (de précision centimétrique), à la fois par défaut de données (pour quelques essais, deux minutes seulement pouvaient être post-traitées, ce qui conviendrait en bi-fréquence mais pas en mono) et à cause du bruit de mesure de phase probablement imputable à l'utilisation d'une antenne patch. Il est donc difficile de concilier les spécifications du GPS cinématique mono-fréquence avec les conditions de mise en œuvre opérationnelle d'un observatoire local de trajectoire, où il est probable que la durée de passage des véhicules sur site (par exemple le virage expérimental ici) sans masquage soit bien en deçà des 10 minutes typiquement nécessaires pour que les algorithmes convergent.

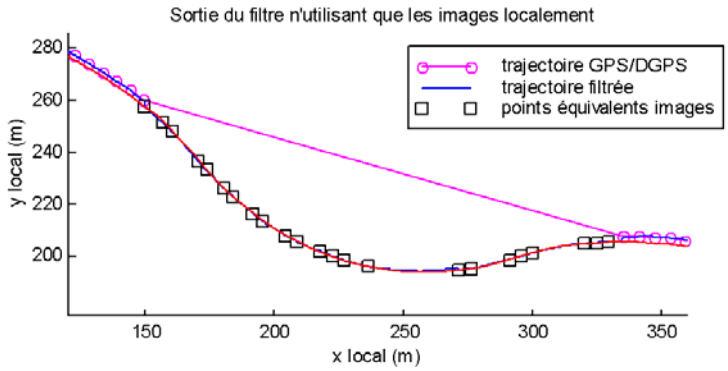


Figure 11 – Sortie de Gyrolis modifié (les points GPS sont inutilisés localement)

Cependant, cette solution mono-fréquence est satisfaisante pour déterminer au mètre près le marquage au droit duquel on peut calculer un écart latéral (par projection), et corriger cet écart à partir du traitement d'image. L'image permet le raffinement en précision (avec au final une localisation proche du décimètre, toutes calibrations faites). Par contre, l'imprécision du GPS mono-fréquence rendrait incompatible la correction à la fois par l'image et par GPS.

L'étude de faisabilité d'un MITL (moyen interne de trajectographie locale) résumée dans cet article se conclut donc sur le constat que le mode de fonctionnement envisagé initialement, basé sur du GPS mono-fréquence avec un récepteur et une antenne bas-coût, n'est pas viable (sauf pour la dimension longitudinale), le problème étant la durée d'observation incompressible de plusieurs minutes sans masquage, et le bruit de réception non toléré par la plupart des algorithmes de post-traitement GPS. Par contre, l'utilisation des images localement donne satisfaction et offre une véritable solution alternative concernant la dimension latérale.

Références

- Antoniou, C., Nowotny B., Rechbauer A. and Linauer M. (2006), "Calibration of Dynamic Traffic Assignment models using floating car data - An application of DynaMIT in Vienna", in Proc. 2nd Int. Symp. in Transportation Simulation, Lausanne.
- Bétaille, D. (2008), « Gyrolis : logiciel de localisation de véhicule en post-traitement par couplage GPS - gyromètre – odomètre », Bulletin des LPC, No. 272.
- Bétaille, D., Toledo R. and Laneurit J. (2008), "Making an Enhanced Map for Lane Location Based Service", in Proc. IEEE ITS Conference, Beijing.
- Goyat, Y., Château T., Malaterre L., and Trassoudaine L. (2006), "Vehicle trajectories evaluation by static video sensors", in Proc. 9th IEEE Conference on ITS, Toronto.
- Ieng, S.S., Tarel J.P. et Charbonnier P. (2004), « Estimation robuste pour la détection et le suivi par caméra », Revue Traitement du Signal, Vol. 21, No. 3.
- Nicolle, P. et Charbonnier P. (2000), Calcam, notice d'utilisation du programme, LCPC.
- Schubert, R., Mattern N., Ahlers F., Schlingelhof M. and Westhoff D. (2009), "Vehicle Positioning for Cooperative Systems - The SAFESPOT Approach", in Proc. 16th World Congress on Intelligent Transportation Systems, Stockholm.
- Tournaire, O., Soheilian B. and Paparoditis N. (2006), "Towards a sub-decimetric georeferencing of ground-based mobile mapping systems in urban areas: matching ground-based and aerial-based imagery using roadmarks", in Proc. ISPRS-1, Paris.
- Veit, T., Tarel, J.P., Nicolle, P. and Charbonnier P. (2008), "Evaluation of Road Marking Feature Extraction", in Proc. IEEE ITS Conference, Beijing.

EVOLUTIONS DES SYSTEMES D'AIDE A LA CONDUITE ET DE SECURITE - QUELQUES ENJEUX LIES A LEUR CONCEPTION ET A LEUR VALIDATION

Diplômé de l'Ecole Centrale de Lille en 1990 et titulaire d'un Doctoral d'Automatique délivré en 1994 par l'université de Lille I.
Responsable stratégie techno-logique du domaine Base Roulante & Caisse Equipée au sein de la Direction de la Recherche et de l'Ingénierie Avancée du Groupe PSA, en charge de la liaison au sol et la structure caisse et ouvrants. Maître Expert Systèmes Pilotés Liaison Au Sol.

Diplômé de l'Ecole Supérieure d'Optique en 1985 et titulaire du DESS CAAE délivré en 1995 par l'IAE de Paris.
Responsable au sein de la Direction de la Recherche et de l'Ingénierie Avancée du Groupe PSA, pour les études concernant les systèmes de sécurité active, les systèmes de sécurité intégrée et les fonctions avancées d'éclairage.

Vincent ABADIE **Jean-François BOISSOU**

PSA Peugeot Citroën
Vélizy-Villacoublay – France

Résumé

Portées par des technologies économiquement accessibles, des fonctions telles que l'AFIL et le "Distance Alert" évitent aux automobilistes de se placer dans des situations présentant un risque pour leur sécurité. Elles ouvrent la voie à des systèmes offrant des niveaux de préconisation et d'assistance croissants, dans un plus grand nombre de scénarios routiers. Ces évolutions ne peuvent toutefois voir le jour qu'en prenant en compte un ensemble de facteurs techniques, juridiques et humains, tels que le respect de la Convention de Vienne, l'acceptabilité par le conducteur et la garantie de sûreté des systèmes. De telles contraintes impliquent souvent de très faibles taux de défaillance, et donc la mise en œuvre de méthodes de conception et de validation adaptées. La définition des fonctions devra être compréhensible par le conducteur, et l'on aura à prendre en compte la complexité et le coût de leur validation.

Mots-clés : Sécurité, aides à la conduite, acceptabilité, sûreté de fonctionnement, fiabilité, validation, simulateur de conduite.

Abstract

Following the advent of affordable technologies, functions such as AFIL (LDW) and Distance Alert support drivers and help them avoid potentially risky driving situations. These functions pave the way for new systems that will provide the driver with increased support, over a growing number of driving scenarios. Nevertheless, such evolutions will require that various technical, legal and human constraints are taken into account; this includes complying with the Vienna Convention, ensuring acceptability by the driver and guaranteeing safety levels. In many cases, these constraints will imply very low failure rates, and will therefore require appropriate design and validation procedures. The specification and action modes of the functions will have to be clearly understandable by the driver, and OEMs will need to take into account the complexity and costs incurred for their validation.

Keywords: Safety, Driver Assistance Systems, Acceptability, Reliability, Validation, Driving Simulator.

1. Evolution des systèmes de sécurité et des fonctions d'aide à la conduite

Les systèmes de sécurité embarqués sur les véhicules modernes ont effectué des progrès considérables, et leur efficacité est reconnue. Il suffit pour s'en convaincre de suivre les tendances consuméristes et réglementaires. Les airbags, l'ABS et l'ESP par exemple, sont aujourd'hui connus de tous. D'autres systèmes passifs tels que les prétensionneurs de ceintures ou les moyens de protection des piétons, peut-être moins connus, sont néanmoins largement déployés. L'appel d'urgence, intervenant après un accident, contribue pour sa part à l'arrivée rapide des secours et leur permet de gagner un temps précieux. Ces concepts et systèmes ont atteint leur maturité et sont pour beaucoup déjà intégrés à la conception de tous les véhicules. Le bénéfice accidentologique associé se rapproche ainsi de son asymptote.

Dans un effort constant de recherche de sécurité pour leurs clients comme pour les autres usagers, les constructeurs automobiles souhaitent améliorer encore ce bénéfice et doivent donc mettre en œuvre de nouveaux moyens. Ils s'appuieront largement pour cela sur des concepts anticipatifs, capables de détecter le risque dans les secondes ou fractions de secondes précédant l'accident et de déclencher des actions appropriées. Ces actions s'étendront en amont du déclenchement des moyens passifs, assimilables pour leur part à une forme de "protection réflexe" – l'anticipation de l'accident apportant une gestion optimisée d'un plus grand nombre de scénarios, et offrant au conducteur une possibilité accrue d'évitement. On est ainsi en accord avec la sagesse populaire selon laquelle « Mieux vaut prévenir que guérir »…

La figure 1 illustre l'enchaînement d'actions possibles avant un accident.

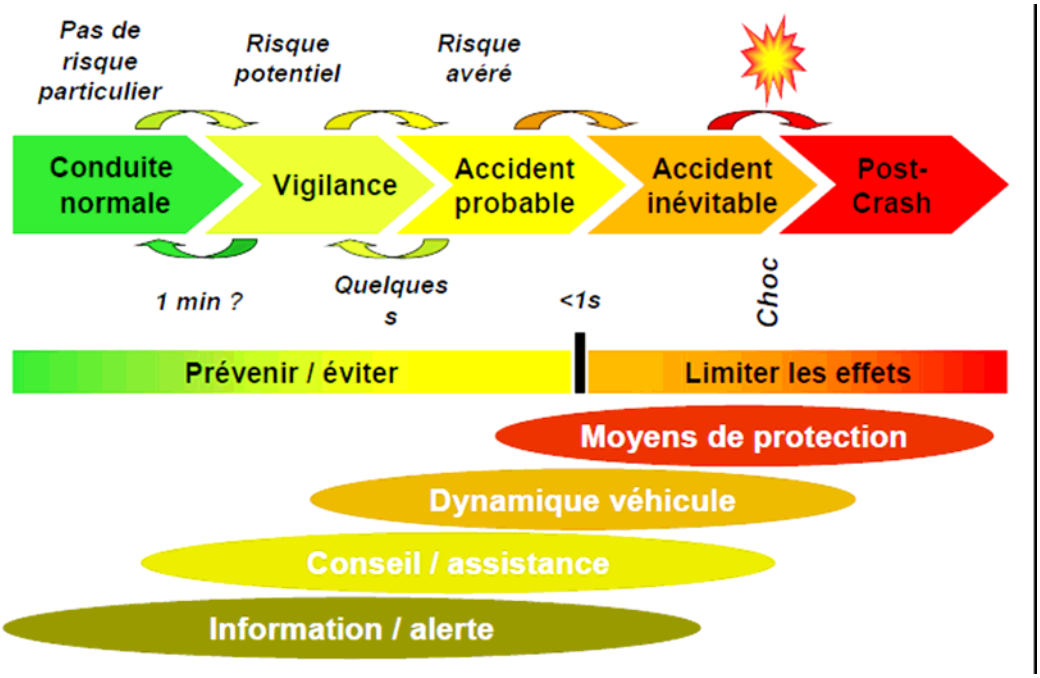


Figure 1 – Enchaînement des phases précédent un accident et exemples d'actions possibles.

Selon les actions retenues, le niveau d'interaction entre les fonctions et le couple conducteur-véhicule sera plus ou moins visible et intrusif ; le tableau 1 propose une gradation des types d'actions possibles, et met en évidence les contraintes associées à chacun d'eux.

Tableau 1 – Types d'actions d'un système d'aide à la conduite, contraintes associées

Actions	Description	Contraintes associées
Information	Informe le conducteur *(ex : navigation, info trafic…)*	Charge cognitive de gestion de l'information.
Affichage	Affiche à l'intention du conducteur une image ou un/des symboles *(ex : vision de nuit…)*	Risque de distraction et de détournement de l'attention du conducteur.
Pré-conditionnement	Configure le véhicule ou l'un de ses systèmes *(ex : pré-conditionnement du système de freinage…)*	Fiabilité / durée de vie des organes sollicités. Le changement de configuration doit autant que possible être transparent pour les occupants.
Alerte	Signale ponctuellement au conducteur un risque particulier *(ex : alerte anticollision, détection de sous-gonflage…)*	L'alerte doit être judicieuse selon les critères du plus grand nombre de conducteurs. Elle doit être efficace sans stresser les occupants du véhicule.
Conseil / assistance	Initie ou assiste une manœuvre du conducteur *(ex : assistance au freinage d'urgence, aide au maintien de trajectoire…)*	Risque d'interaction avec la conduite. Les modalités d'assistance ne doivent pas inciter le conducteur à se reposer exclusivement sur le système.
Contrôle	Déclenche de manière autonome une action de contrôle du véhicule ou d'un de ses systèmes *(ex : essuyage automatique, allumage automatique des projecteurs, ESP, freinage automatique…)*	Risque d'interaction forte avec la conduite. Les intempestifs doivent être très rares, en particulier pour des actions dynamiques.

Il apparaît ainsi que, si les progrès technologiques ouvrent un vaste champ d'applications, il convient de pondérer ce potentiel en prenant en compte l'ensemble des risques et contraintes introduits simultanément par le degré d'intrusivité des fonctions.

Au premier rang de ces contraintes figure naturellement la Convention de Vienne, qui stipule que « tout conducteur doit constamment avoir le contrôle de son véhicule » ; le concepteur doit ainsi veiller à ce que les fonctions embarquées n'empiètent pas sur le libre-arbitre du conducteur ni sur ses capacités de manœuvre.

Les systèmes doivent également respecter de strictes règles de conception, et la sûreté de fonctionnement doit être analysée dès les phases amont de leur étude. Ces règles sont en particulier précisées par des documents tels que la norme ISO 26262, en cours d'élaboration et qui est la déclinaison au secteur automobile de la norme CEI 61508, elle-même traitant de manière générique de la sécurité fonctionnelle des systèmes électriques et électroniques programmables. Dans le cas des systèmes de sécurité active, l'analyse de sûreté de fonctionnement doit en particulier prendre en compte des limites intrinsèques des capteurs tels que radars ou caméras.

Enfin, au moins aussi contraignant est le souci de garantir l'acceptabilité de la fonction et de ses modes d'action, par le conducteur et les passagers du véhicule. Elle doit inspirer confiance

au conducteur ; son action doit être intuitive et ses objectifs évidents, et elle doit se déclencher à un moment où le conducteur admette le bien-fondé de son intervention. Ce dernier point peut être d'autant plus complexe à instruire, que les styles de conduite varient d'un utilisateur à l'autre. Faute de respecter ce besoin, le système pourra s'avérer stressant, voire induire une impression d'antagonisme entre le conducteur et son véhicule – ce qui induira un phénomène de rejet et la désactivation du système, annulant son bénéfice potentiel.

Pour éviter cet écueil et pour respecter les normes et règlements cités ci-dessus, le plus grand soin est apporté à la conception et à la validation des futurs systèmes de sécurité active. Dans la suite de l'exposé, nous présenterons quelques exemples et nous mettrons en évidence la nécessité d'avoir dans le domaine une approche progressive, en particulier du fait que les capteurs utilisés sont encore imparfaits et que certaines applications seront subordonnées aux progrès technologiques.

2. Quelques exemples pratiques basés sur des fonctions existantes

En s'appuyant sur quelques cas concrets, ce chapitre se propose de tracer des axes d'évolution de fonctions existantes ou pour lesquelles les technologies sont disponibles ; et de mettre à chaque fois en évidence les questions qui se posent au constructeur qui doit garantir la sûreté et la qualité de son produit.

2.1 L'AFIL (Alerte de Franchissement Involontaire de Ligne) et la sécurité latérale

Ce dispositif avertit le conducteur lorsqu'il franchit involontairement (sans actionner son indicateur de direction) une ligne matérialisant le bord de sa voie de circulation (Figure 2).

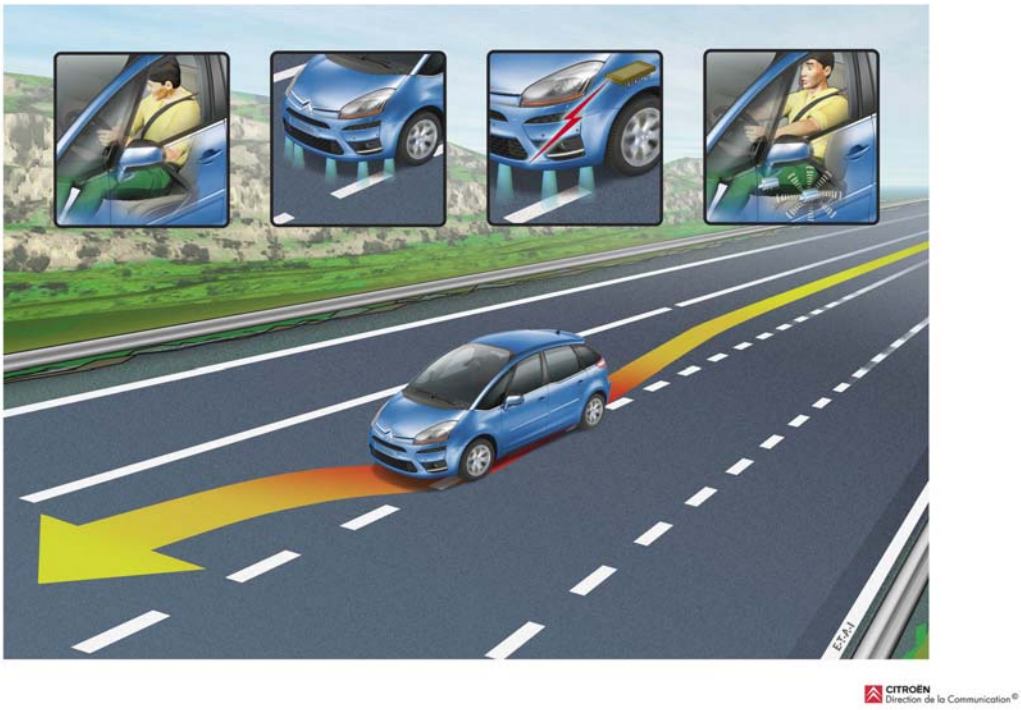


Figure 2 – AFIL (Alerte Franchissement Involontaire de Ligne)

L'AFIL intervient dans les cas de perte de vigilance du conducteur, alors qu'un départ progressif de sa voie peut l'amener à une sortie de route ou à une collision frontale avec un véhicule roulant en sens inverse. On estime par exemple que les accidents de ce type en ligne droite, représentent en France environ 20% des véhicules légers accidentés, 30% des blessés

graves et 40% des tués ; dans 4 cas sur 10 ils n'impliquent qu'un seul véhicule. Citroën a mis cette fonction sur le marché dès 2004, en s'appuyant sur la solution technique alors la plus robuste et la plus économique : des capteurs infrarouge scrutent la route sous l'avant du véhicule et détectent le franchissement d'une ligne par variation de réflectivité. Une alerte latéralisée est générée à l'intention du seul conducteur par le biais de vibreurs dans l'assise de son siège.

Les récents progrès technologiques, en particulier en matière de capteurs d'images haute dynamique CMOS et concernant les puissances de calcul embarquées, rendent le recours à la vidéo viable techniquement comme économiquement. Une caméra implantée en haut de pare-brise analyse l'image de la route jusqu'à une cinquantaine de mètres devant la voiture et détecte les marquages au sol ; il est alors aisé de déterminer la géométrie de la voie de circulation et la position du véhicule par rapport à sa voie. Disposant de l'information quelques secondes devant le véhicule, il devient ainsi possible de concevoir des systèmes anticipatifs qui aident le conducteur à rester dans sa voie. En appliquant un léger couple à la direction, on alerte le conducteur en même temps qu'on lui fournit implicitement un conseil sur la manœuvre à effectuer ; le temps de réaction global est réduit puisque la manœuvre est initiée alors que le conducteur est encore en train d'analyser la situation à propos de laquelle on vient de l'alerter.

Pour attractive que soit une telle fonction, il convient de rappeler quelques contraintes qui devront être prises en compte lors de sa conception :

- il est nécessaire de laisser au conducteur la totale maîtrise de son véhicule. Pour cela l'action sur la direction doit à tout instant autoriser une reprise de contrôle par le conducteur. Les stratégies de commande doivent être optimisées dans ce but, reprenant par exemple des concepts mis en œuvre pour le couplage ESP-direction sur Peugeot 207 ;
- le capteur vidéo n'étant pas absolument fiable peut perdre les lignes (indisponibilité de la fonction) ou être leurré par de fausses détections (embranchements…). Il faut donc adapter le niveau d'action à cette contrainte et éviter que la fonction n'engendre un excès de confiance de la part du conducteur ;
- les lois de commande doivent être aussi transparentes que possible et autoriser le conducteur à suivre la trajectoire qu'il souhaite à l'intérieur de sa voie ;
- l'architecture électronique du système doit être conçue selon les règles classiques de sûreté de fonctionnement.

2.2 La fonction "Distance Alert" et la sécurité frontale

Cette fonction informe en permanence le conducteur du temps inter-véhicules qui le sépare du véhicule précédent, et l'alerte si ce temps devient inférieur à un seuil. Le "Distance Alert" (figure 3) a pour but d'aider le conducteur à respecter une distance de suivi minimale, lui évitant ainsi de se placer dans une situation à risque. Il est communément admis qu'un suivi à 2s correspond à une marge de sécurité raisonnable en cas de ralentissement brusque ou d'arrêt du véhicule précédent. La réglementation impose ainsi 2s en France et en Finlande, 1,8s en Allemagne, ces mêmes valeurs étant recommandées dans de nombreux autres pays.

Les conducteurs peuvent avoir du mal à estimer visuellement cette distance, qui varie avec la vitesse ; également, ils accordent trop souvent une confiance excessive à leurs réflexes. Selon l'ONISR, en France en 2004, plus de 4 200 personnes ont ainsi été victimes d'une collision en chaîne sur l'ensemble du réseau routier (91 personnes tuées et plus de 4 100 blessés). Sur autoroute, un tiers des accidents résulte de collisions par l'arrière ou en chaîne.

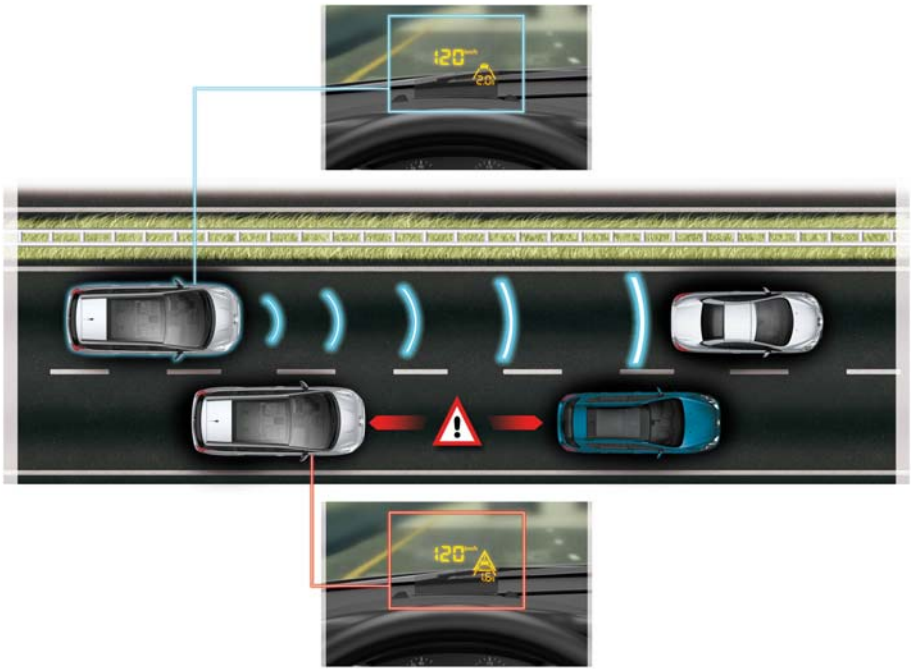


Figure 3 – "Distance Alert"

Profitant de l'opportunité offerte par l'émergence de technologies radar plus abordables que les versions disponibles auparavant, Peugeot a commercialisé le "Distance Alert" sur 3008 et 5008 dans le but de démocratiser les fonctions de sécurité anticipatives. L'information est restituée au conducteur via un afficheur tête haute, lui permettant ainsi de disposer de l'information sans quitter la route des yeux.

En se référant au chronogramme présenté figure 1, la fonction "Distance Alert" intervient dans les phases de conduite normale et de vigilance (un risque potentiel étant induit par un suivi à trop courte distance). Une évolution logique sera d'étendre le domaine d'action du système vers les scénarios plus critiques, en se rapprochant de la collision. On déclenchera d'abord une alerte en cas de risque avéré, pour prévenir un conducteur distrait qu'il doit rapidement entreprendre une action correctrice (on se situe typiquement de l'ordre de 2s avant le choc). Puis le freinage pourra être déclenché de manière autonome si le conducteur n'a pas réagi à la sollicitation précédente (cette intervention se situant typiquement dans la seconde qui précède la collision).

On pourra ainsi déployer largement des fonctions de sécurité apportant un bénéfice croissant. A titre d'exemple, des études ont montré que plus de la moitié des accidents mortels en secteur avant, résultent de l'inattention du conducteur (ITARDA – 2002), et qu'un défaut d'attention est à l'origine de 80% des accidents (VTTI – 2007). Une alerte ramène l'attention du conducteur sur la route, et lui permet de raccourcir son temps de réaction de l'ordre de 0,8s – réduisant ainsi d'un facteur 2 à 3 le taux de collision fronto-arrière (NHTSA – 2005).

Ces fonctions présentent toutefois un fort caractère intrusif et peuvent interférer avec les actions du conducteur ; leur conception devra donc là encore prendre en compte :

- la nécessité pour le conducteur de garder la maîtrise de son véhicule et de pouvoir reprendre la main sur un freinage déclenché automatiquement ;

- les imperfections du ou des capteurs, qui vont fortement peser sur la conception et limiter les performances globales. Cette contrainte imposera en particulier de cadrer les scénarios traités par la fonction (les alertes sont aujourd'hui déclenchées dans les situations de suivi, mais leur fonctionnement – et a fortiori celui du freinage autonome – présente encore trop d'aléas dans un scénario fronto-frontal par exemple). On limitera également l'amplitude des actions permises au système afin d'en contrôler les conséquences ;
- la non-connaissance en temps réel de l'ensemble des paramètres caractérisant le scénario (par exemple l'état de la route et l'adhérence ne sont pas connus) ;
- l'efficacité des IHM qui dans une situation d'urgence doivent pouvoir être interprétées rapidement, sans risque de confusion et sans distraire de la route l'attention du conducteur ;
- le risque de générer à terme une sur-confiance du conducteur s'il se persuade que son véhicule pourra éviter seul les collisions. On est ainsi amené à limiter la décélération et à déclencher très tard les fonctions, ce qui est en accord avec le principe de préséance de la volonté du conducteur ; par voie de conséquence, dans un grand nombre de cas, on n'évite pas la collision mais on se contente d'en tempérer les effets en réduisant la vitesse au choc.
- les contraintes de sûreté de fonctionnement répercutées sur l'architecture du système ;
- et enfin le fait que l'ensemble des compromis imposés par les contraintes ci-dessus, doivent aboutir à des fonctions dont le périmètre et les modes d'action soient facilement compréhensibles et acceptées par le conducteur.

2.3 La préconisation de vitesse et le respect des vitesses légales

En particulier sous l'impulsion des Pouvoirs Publics, il y a eu une prise de conscience massive de l'importance des limitations de vitesse. La demande ainsi créée a contribué à générer un marché d'opportunité pour les équipements de navigation portables, qui proposent au conducteur une indication de la réglementation locale en matière de vitesse maximale autorisée. Basés uniquement sur le contenu des bases de données de navigation, ces systèmes sont toutefois tributaires de leurs délais de mise à jour ; de plus ils ne peuvent pas fournir d'information pertinente concernant les limitations temporaires (panneaux variables, zones de travaux…).

Une solution technique, également rendue possible par les progrès des systèmes d'imagerie, consiste au recours à une caméra capable de reconnaître les panneaux par traitement de l'image vidéo. Si elle détecte bien les limitations de vitesse, il y a en revanche de nombreux cas où la caméra n'est pas capable de déterminer si elles s'appliquent effectivement au véhicule (dans les zones denses, en région parisienne par exemple, seule une fraction des panneaux vus concerne le véhicule porteur de la caméra). Une approche « haut de gamme », proposée récemment par certains constructeurs, couple caméra et navigation. Une telle stratégie améliore la qualité de l'information, sans toutefois être totalement robuste (si deux votants sont d'avis contraire, qui doit l'emporter ?)

L'enjeu principal pour favoriser le déploiement de ces systèmes, est d'améliorer la fiabilité de l'information fournie. Deux pistes sont envisageables :
- enrichir autant que de nécessaire le contenu des bases de données, le taux de couverture et la fréquence de mise à jour des informations pertinentes. Si ces informations doivent être exploitées par des fonctions à caractère sécuritaire ou réglementaire, il importe d'assurer la fiabilité tout au long de la chaîne d'acquisition et de transfert de l'information, ce qui peut nécessiter une implication des pouvoirs publics (cette problématique de la certification des informations fournies a par exemple été abordée par le forum ADASIS) ;
- exploiter des moyens de communication entre les véhicules et l'infrastructure pour que le mobile soit informé en temps réel de la vitesse légale en vigueur sur le tronçon de route

parcourue. Il sera pour cela possible de s'appuyer sur les travaux menés à l'échelle européenne par le consortium Car2Car.

L'IHM et le mode d'intervention de la fonction devront très probablement se limiter à l'informatif ou à l'alerte de survitesse. En effet un couplage systématique au limiteur de vitesse véhicule, induirait un comportement rigide de nature à entraîner le rejet de la fonction par les utilisateurs. De plus des modifications inattendues et permanentes de la vitesse peuvent perturber la conduite.

3. Quelques outils et méthodes utilisables pour le développement et la mise au point

Après avoir exposé certaines des questions qui se posent aux constructeurs dans le cadre des évolutions de quelques fonctions, nous allons présenter les outils et méthodes dont ils disposent pour assurer l'étude, le développement et la validation de ces systèmes.

3.1 L'application de méthodes d'analyse SdF normalisées

La norme ISO 26262, en cours d'élaboration, est appelée à devenir la référence applicable pour l'étude sûreté de fonctionnement des applications automobiles. Elle définit des objectifs d'occurrence pour les défaillances d'un système lorsqu'elles sont susceptibles d'entraîner un accident. Ces objectifs sont imposés selon une classification dite ASIL (Automotive Software Integrity Level) qui prend en compte :

- la contrôlabilité (capacité du conducteur et des autres usagers à garder le contrôle en cas de défaillance). Cette cotation demande une connaissance approfondie du comportement des conducteurs, en particulier lorsqu'ils sont confrontés à une situation d'urgence, dans le cas des fonctions qui nous intéressent. Cette connaissance peut être développée par le biais de roulages dédiés ou en simulateur de conduite ;
- l'exposition du véhicule (% du temps auquel il est confronté à une situation susceptible d'entraîner une conséquence donnée en cas de défaillance). Pour l'évaluer, il est nécessaire d'analyser les statistiques relatives aux différents facteurs externes influant sur les conséquences d'une défaillance (trafic environnant, conditions météorologiques, situation de conduite…). Pour l'étude de fonctions nouvelles, ont peut être amené à mener des campagnes d'acquisition spécifiques ;
- la sévérité (gravité des conséquences en cas de contrôle imparfait). Des données accidentologiques et biomécaniques précises sont alors nécessaires dès lors que l'on considère des défaillances pouvant potentiellement aboutir à un accident.

Selon la cotation résultante, les taux objectifs de défaillance peuvent aller de 10^{-6}/h (ASIL A) à 10^{-9}/h (ASIL D). Si on applique un processus de validation sur route, ces très faibles probabilités peuvent imposer des roulages allant jusqu'à plusieurs dizaines de milliards de kilomètres, donc peu réalistes.

Pour éviter ces écueils, il s'avérera nécessaire de spécifier un périmètre fonctionnel sur lequel les défaillances n'ont que des conséquences limitées, pouvant être traitées selon les méthodes classiques d'assurance qualité ("QM" pour "Quality Management"). Cela amène à effectuer des compromis sur le domaine et les modalités d'action, au bénéfice d'une réduction du risque associé. On s'appuiera également sur le retour d'expérience des fonctions et systèmes existants et dont l'usage a montré qu'ils présentent un niveau de risque acceptable. Encore faut-il que de telles données soient disponibles et représentatives, s'agissant de fonctions innovantes donc présentant une rupture plus ou moins marquée avec l'état de l'art. Enfin selon les cas on pourra recourir à la simulation (§3.2).

3.2 Les tests panels et la mise en situation

On a vu que l'interaction entre le conducteur et la fonction doit être étudiée :

- pour évaluer les réactions du conducteur et, dans le cas d'une fonction active, les interférences entre le comportement autonome du véhicule et la volonté de l'utilisateur ;
- pour s'assurer de la bonne compréhensibilité des IHM, messages générés et actions déclenchées par la fonction ;
- pour estimer l'acceptabilité des interventions du système, justifiées ou non, et leur bon timing de déclenchement.

Cette analyse est menée en confrontant des testeurs experts ou naïfs selon les cas, à des scénarios pertinents avec ou sans intervention du système. Ces essais peuvent être menés sur circuit et/ou sur route ouverte, en utilisant un véhicule doté de la fonction et de moyens de test appropriés. Pour les fonctions de sécurité à proprement parler, les scénarios pertinents pourront toutefois présenter un niveau de risque élevé, et il ne sera pas possible de mener des tests physiques sans mettre en jeu la sécurité des testeurs voire des véhicules environnants.

Dans ce cas, le recours à un simulateur de conduite s'impose (figure 4). Pour assurer un réalisme suffisant, les simulateurs modernes intègrent à la fois une composante visuelle (génération de scène de conduite réaliste) et une composante dynamique (mouvements et ressenti), sans compter l'ensemble des IHMs du poste de conduite. Au-delà des aspects sécuritaires, la mise en œuvre de cet outil permet de soumettre les testeurs à des scénarios calibrés et reproductibles.

Figure 4 – Simulateur dynamique de conduite Sherpa développé par PSA

3.3 La simulation fonctionnelle

Pour avoir une approche robuste et couvrir un grand nombre de situations de vie, on s'appuiera sur la simulation à partir de données enregistrées sur route ouverte. Ces acquisitions comporteront les données issues des capteurs ainsi que des informations de

référence (conducteur, véhicule, vérité terrain). Il sera alors possible de rejouer la fonction en temps différé, en analysant son action selon le paramétrage envisagé. Ce mode opératoire permet d'augmenter considérablement le volume de tests accessibles pour la mise au point de certaines fonctions.

Il faut toutefois garder à l'esprit que pour garantir la validité des conclusions issues de ces simulations, les données doivent être suffisamment représentatives de la technologie du capteur et de son implantation cible sur le véhicule série. Il faudra donc veiller si besoin à réactualiser ces données régulièrement, pour tenir compte des évolutions des technologies de capteurs et des particularités du véhicule en développement.

4. Conclusion

Les progrès technologiques récents permettent d'envisager la mise en œuvre d'un ensemble d'aides à la conduite et de sécurité à un coût autorisant leur déploiement sur un nombre croissant de véhicules. Intervenant en amont de l'accident, les systèmes actifs apporteront un bénéfice important, complétant les moyens de protection passifs actuels.

La revue des contraintes auxquelles est confronté le concepteur, montre que des méthodes et moyens de conception et de validation spécifiques devront être utilisés. Ces procédures doivent être prises en compte dans le plan de déploiement des fonctions, pour mener les études et validations préalables avant la mise sur le marché des systèmes. Cette phase initiale est en effet indispensable pour garantir la sûreté et l'acceptabilité des fonctions nouvelles, appelées à présenter un bénéfice sécuritaire croissant.

Références

- Commission Economique pour l'Europe – Comité des Transports Intérieurs (Vienne, le 8 novembre 1968), « Convention sur la Circulation Routière – Amendement 1 ».
- ISO TC22 (projet de norme ISO 26262, en cours d'élaboration), « Véhicules Routiers – Sécurité Fonctionnelle ».
- CEI (norme 61508, version en vigueur), « Sécurité fonctionnelle des systèmes électriques / électroniques / électroniques programmables relatifs à la sécurité ».
- ONISR (2004), Fichier national des accidents corporels de la circulation routière en France.
- Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer (France), Données Sécurité Routière.
- ITARDA (Japon – 2002), "Why do Rear-End Collisions Occur? Contributing Driver Errors".
- NHTSA (USA- août 2005), "Forward Collision Warning Requirements Project – Tasks 2 and 3a Final Report".

RESULTATS ET PROJET D'EXPERIMENTATION DES SYSTEMES COOPERATIFS ROUTIERS EN FRANCE

G. SEGARRA **A.K. MOKADDEM** **M. LENARDI**

RENAULT
TCR Guyancourt, France

HITACHI Europe
Sophia Antipolis, France

Résumé

Les systèmes coopératifs routiers basés sur les communications V2V (Vehicle to Vehicle) et V2I (Vehicle to Infrastructure) offrent des potentialités importantes en termes d'amélioration de la sécurité routière et de la fluidité du trafic. Les concepts et nouvelles technologies supportant ces systèmes ont été mis en œuvre, pour ce qui concerne la sécurité routière, au niveau Européen dans le cadre de la démonstration d'interopérabilité C2C-CC (Car to Car Communication Consortium) réalisée en octobre 2008. Ils ont été complétés et consolidés au niveau des projets Européens CVIS et SAFESPOT. L'étape suivante déjà démarrée au niveau de l'Allemagne avec le projet SIM-TD, consistera à passer au stade d'expérimentations, en environnement réel au moyen d'une flotte de véhicules et d'un nombre conséquent d'unités bord de route. Cet article fait donc un point sur les résultats obtenus depuis quelques années par Renault dans le cadre de la Démonstration C2C-CC et du projet SAFESPOT. Il présente l'étape suivante proposée en France à travers le projet SCORE-F labellisé récemment par les pôles de compétitivité MOV'EO et System@tic.

Mots-Clés : Systèmes coopératifs, sécurité routière, résultats, expérimentation, C2C-CC, SAFESPOT, Communication V2X, sécurité primaire, SCORE-F, FOT.

Abstract

Road co-operative systems based on V2V and V2I communications offer some important potentialities in terms of road safety and traffic efficiency improvements. The main concepts and new technologies supporting these systems, for road safety, have already been tested and demonstrated at the European level in the scope of the C2C-CC interoperability demonstration achieved in October 2008. They have been extended and consolidated in large European projects such as CVIS and SAFESPOT. The next step already started in Germany with the SIM-TD project will consist to experiment them in real environments through a consistent fleet of vehicles and road side units within the scope of Field Operational Tests (FOT). This article presents the results obtained so far by Renault through the preparation and realization of the C2C-CC interoperability demonstration and the SAFESPOT project. It also presents the next step proposed in France through the SCORE-F project which obtains the MOV'EO and System@tic competitiveness pole label.

Keywords: Co-operative systems, road safety, results, experiment, C2C-CC, SAFESPOT, V2X Communication, primary safety, SCORE-F, FOT.

1. Introduction

Les systèmes coopératifs routiers sont en gestation au niveau de la recherche mondiale depuis plus de 10 ans. Leur principe consiste à développer des communications directes entre véhicules routiers (V2V) et entre véhicules et unités d'infrastructure routières (V2I / I2V). Ces communications temps réel, continues, doivent permettre à chaque véhicule en mobilité, une fois le système complètement déployé, de se construire en temps réel (au niveau de la seconde) une perception complète et précise de son environnement dynamique (de l'ordre de 300 m de rayon autour de ses antennes d'émission / réception). Cette perception étendue rend alors possible une analyse de risque de collision temps réel basée sur la connaissance des trajectoires énergétiques (trajectoires véhicules + vélocités + caractéristiques massiques des véhicules) respectives suivies par les véhicules évoluant autour du véhicule considéré. Basée sur cette analyse de risque, lorsque qu'un risque de collision est détecté entre deux véhicules ou plus, des actions de correction des trajectoires énergétiques peuvent alors être entreprises. Ces actions de type variation des vitesses des véhicules ou changement de trajectoires peuvent être obtenues par une assistance à la conduite ou par des actions directes sur les véhicules via leurs systèmes électroniques embarqués. Dans le cas d'une généralisation des actions directes sur les véhicules, on peut considérer que ceux-ci deviennent des robots en phase de risque de collision.

2. Démonstration d'interopérabilité du consortium C2C-C

L'ensemble des constructeurs automobiles développent au niveau mondial ce nouveau concept de système coopératif routier. Au niveau Européen cela s'est traduit par la création d'un consortium automobile, le C2C-CC (Car to Car Communication Consortium : http://www.car-2-car.org). L'une des missions de ce consortium est de démontrer l'interopérabilité des véhicules proposés par ses membres constructeurs. C'est ainsi qu'en octobre 2008, les 9 constructeurs automobiles constituant le Comité Directeur du C2C-CC (AUDI, BMW, DAIMLER, FIAT, HONDA, OPEL, RENAULT, VOLVO Truck, VW) ont démontré l'interopérabilité de leurs véhicules à travers 4 cas d'usage de sécurité routière décrits ci après. Ces constructeurs ont été fortement supportés par leurs équipementiers et en particulier : ALPINE, DELPHI, DENSO, DLR, HITACHI, NEC, SIEMENS).

L'interopérabilité entre systèmes distribués requiert la définition de standards au niveau de l'ensemble des couches fonctionnelles du modèle OSI de l'ISO. C'est ainsi que l'industrie automobile a défini une pile technique incluant l'usage de la technologie IEEE 802.11p au niveau physique et MAC ainsi que les protocoles de communication et d'application présentés sur la figure 1 ci-dessous. Cette figure présente également l'implémentation réalisée par Renault et ses partenaires pour le support des standards retenus.

Quatre cas d'usage ont été retenus :

- L'alerte danger local sur véhicule immobilisé (V2V),
- L'alerte danger routier à partir d'une unité bord de route (I2V),
- L'indication d'un véhicule prioritaire en approche (V2V)
- La sécurité d'un motocycliste à une intersection (V2V).

Associé à ces 4 cas d'usage il a été développé une application de monitoring du trafic sur le circuit d'essais (à partir de deux unités bord de route). Il a été également testé une application de sécurité permettant la signature des messages diffusés et leur authentification en réception.
Dans ce cadre, Renault a choisi de coopérer avec Hitachi, équipementier de premier rang au niveau de l'Alliance Renault – Nissan.

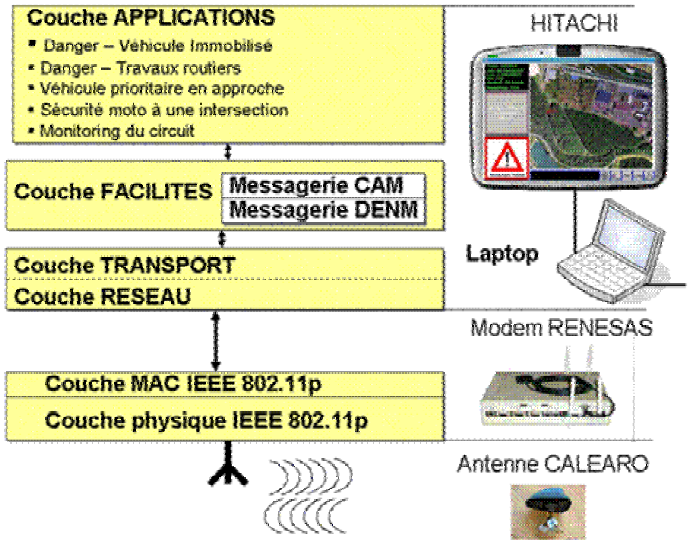


Figure 1 – Modèle fonctionnel et d'implémentation du système Renault

Le développement des prototypes a donc été réalisé sur la base d'une spécification commune développée par les partenaires du C2C-CC (ETSI TR 102 698, 2008). Les essais ont alors pu être réalisés en 2 temps :

- Premier temps, au niveau des pistes gérées par le LIVIC à Versailles Satory.
- Second temps, à plusieurs reprises au niveau du centre d'essais d'Opel à Dudenhofen en Allemagne près de Francfort.

2.1 Résultats des essais sur les pistes de Satory

L'objectif était de vérifier les fonctionnalités du système et ses performances sur un circuit proche de celui utilisé lors des démonstrations d'interopérabilité. Une semaine de tests a donc été organisée en juillet 2009 par Renault et ses partenaires sur le petit circuit d'essais de Satory se trouvant en sous-bois.

Les tests fonctionnels ont consisté à valider les 4 applications développées par Hitachi Europe et permettant de supporter les 4 cas d'usage spécifiés au niveau du C2C-CC. Avant cette vérification, un certain nombre de tests de performance de la technologie IEEE 802.11p des antennes associées et du GPS différentiel utilisé ont été réalisés. Pour cela, les modems RENESAS avaient été réglés à une puissance d'émission de 10 dbm. Le standard Européen harmonisé (ETSI ES 202 663, 2008)) prévoit une puissance d'émission maximum de 33 dbm. Nous ne rentrerons pas dans le détail des résultats, ce qui entrainerait une présentation trop volumineuse. Les tests on été effectués aussi bien en zones dégagées qu'en zones boisées. Ils ont été effectués en statique (véhicules arrêtés) avec des distances variables entre véhicules (de 50 à 300m). Des tests en roulage ont été également effectués à des vitesses comprises entre 20 et 70 Km / heure (1 véhicule arrêté et un véhicule roulant). Les mesures réalisées consistaient à mémoriser le nombre de paquets de données perdus en fonction des distances séparant les véhicules, des vitesses respectives de ceux-ci et des tailles des paquets émis au niveau MAC (entre 500 octets et 2 kilo-octets).

En conclusion :

- La communication entre véhicules se trouvant en ligne de vue directe (LOS : Line of Sight) n'a pas posé de problème à différentes vitesses avec des tailles de paquets différents. Le nombre de paquets perdus augmentait avec la taille des messages tout en restant cependant à un niveau raisonnable (< 30%) ; Cependant la portée se trouvait limitée à environ 200 m avec une puissance de 10dbm, la puissance d'émission des modems a dû alors être portée à 21 dbm (recommandée au niveau C2C-CC pour la démonstration).
- Des trous noirs (absence de communication) sur quelques mètres ont pu être observés, en particulier en un point du circuit, sans explication rationnelle.
- Lorsque les véhicules se trouvent séparés par une zone comprenant une densité élevée d'arbres, toute communication directe entre ces véhicules devient impossible.
- La précision des positionnements des véhicules était tout à fait satisfaisante avec un GPS Différentiel (10 à 20m). Cependant des perturbations des signaux GPS ont pu être observées certains jours.

2.2 Résultat des essais sur le circuit Opel de Dudenhofen

Avant la réalisation des premiers essais, des tests d'interopérabilité à différents niveaux ont été effectués en laboratoire (3 séances de deux jours chacune).
L'ensemble des constructeurs automobiles participants et de leurs équipementiers étaient présents. Ces tests se sont déroulés en trois phases successives :

- Interopérabilité au niveau communication (couches fonctionnelles des niveaux 1 à 4 du modèle de référence OSI).
- Interopérabilité au niveau application, incluant les émissions / réceptions des messages applicatifs CAM (Cooperative Awarness Message) et DENM (Decentralized Environmental Notification Message). A ce niveau il a été également testé le cryptage des messages CAM générés par le véhicule d'intervention ainsi que leurs authentifications en réception.
- Bonne interprétation des données échangées au niveau application pour les 4 cas d'usage sélectionnés. Cela s'est traduit par la présentation pertinente d'informations aux conducteurs (Figure 2 : exemples d'IHM développées par Hitachi Europe / Renault).

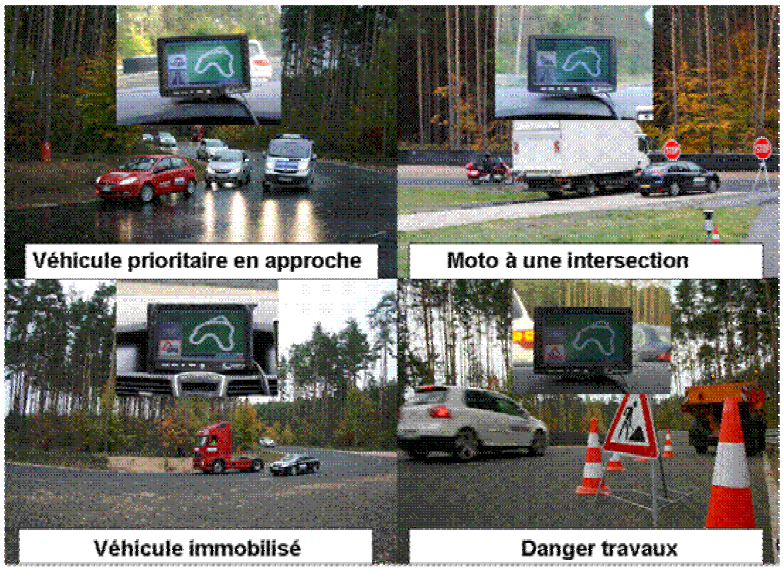


Figure 2 - IHM Conducteur signalant un danger local

Cette présentation a été dans un premier temps simulée au moyen d'un programme reproduisant la démonstration ciblée.

L'étape suivante a consisté à effectuer un certain nombre d'essais en grandeur nature sur le circuit d'Opel. Les cas d'usage ont été réalisés dans des conditions présentant un risque réel :

- Obstacle (camion) masquant au conducteur du véhicule automobile l'arrivée d'une moto à l'intersection choisie.
- Véhicule immobilisé (camion Volvo) dans un virage.
- Travaux dans un virage.
- Véhicule prioritaire remontant une file de véhicules.

Enfin, des démonstrations ont pu être réalisées en présence d'une centaine d'invités et de membres du consortium C2C-C.

En conclusion, ces démonstrations se sont déroulées de façon satisfaisante avec bien sûr quelques dysfonctionnements résiduels. Cela a permis à l'ensemble des partenaires de franchir une première étape au niveau de l'usage de la technologie WAVE(IEEE 802.11p) et de la pile de protocoles préconisée par le consortium C2C-C.

3. Résultats principaux du projet Européen SAFESPOT

3.1 Quelle architecture pour le déploiement des systèmes coopératifs routiers?

Il est important lorsqu'on parle des systèmes coopératifs routiers de garder à l'esprit que le déploiement est tributaire de l'interopérabilité entre tous les éléments communicants. C'est dans ce sens que la démonstration du consortium C2C-CC a montré la convergence de l'industrie automobile vers un standard de communication unifié. Mais l'existence d'un standard de communication ne suffit pas pour le déploiement, car les futures applications se basant sur les communications V2V et V2I seront inévitablement intégrées à des systèmes déjà présents dans nos véhicules d'aujourd'hui, comprenant la navigation, la localisation GPS, la télématique, la téléphonie, les IHM visuels et sonores.

Type de projet: Projet Intégré (IP)
Financement: Commission Européenne Direction Générale de la Société de l'Information et média
Supporté par: EUCAR
Coordinateur du projet: Centre de recherche de FIAT (CRF)

Consortium: 51 partenaires (de 12 états membres)
- Constructeurs (Autos, motos, camions)
- Opérateurs routiers
- Equipementiers
- Instituts de recherche
- Universités

Planning: Février 2006, Juin 2010
Budget total: 38 M€ (support de la Commission Européenne: 20,5 M€)

Le projet SAFESPOT, a eu comme principal défi de concevoir une architecture innovante afin de supporter plusieurs applications coopératives (Mokaddem et al. 2008). La pierre angulaire de cette architecture est la capacité du système à acquérir les données provenant de différentes sources (GPS, capteurs, communication ad hoc) à les fusionner et à les traiter de manière à avoir une connaissance de l'environnement et du contexte du véhicule /de la borne d'infrastructure (Figure 4).

Figure 3 - Organisation du projet SAFESPOT

La connaissance de l'environnement et du contexte est essentielle pour pouvoir déployer dans le futur, des systèmes coopératifs routiers intelligents car elle prédispose automatiquement le système (et donc l'application souhaitée par l'utilisateur) dans le cas d'usage approprié et permettent ainsi d'alerter uniquement dans les cas pertinents les utilisateurs concernés par le risque routier.

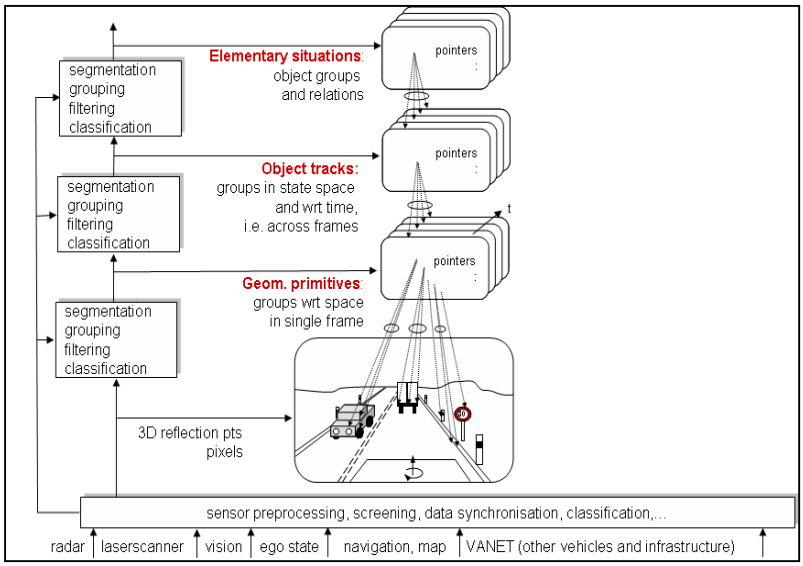


Figure 4 - Principe de fusion des données utilisé par le projet SAFESPOT

3.2 La Carte dynamique locale dans l'architecture SAFESPOT

La carte dynamique locale *(LDM : Local Dynamic Map*) est l'élément central de l'architecture SAFESPOT (Brakemeier et al. 2008), c'est une base de données que l'on pourrait conceptualiser en une structure à quatre couches :

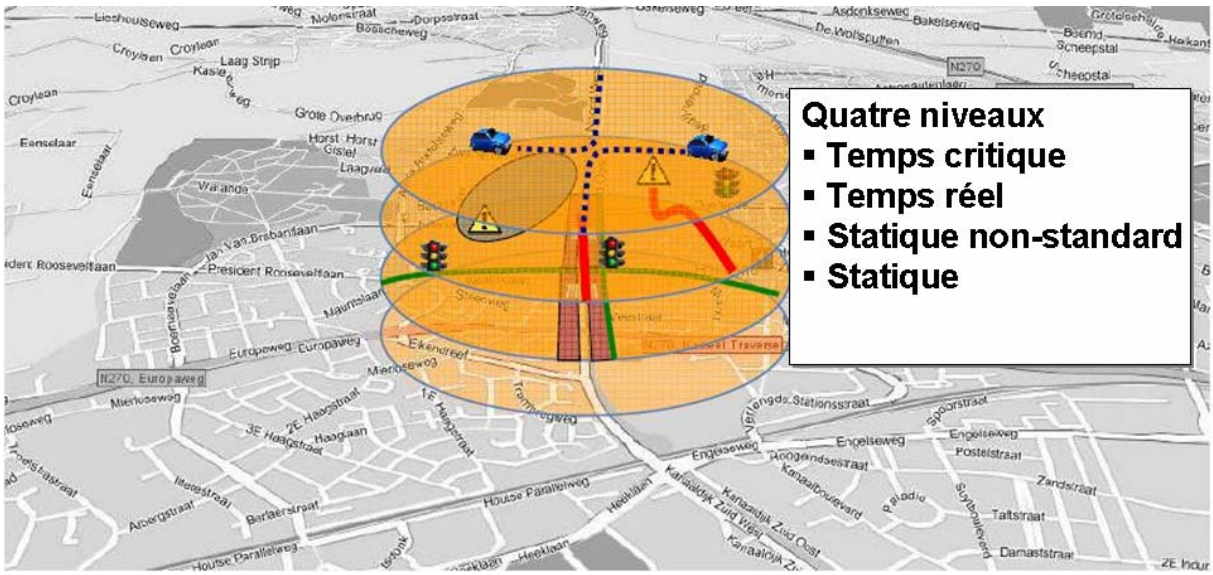


Figure 5 - Structure à quatre couches de la LDM

- Couche 1 : cartographie statique (équivalente à celle que l'on trouve sur les systèmes de navigation)
- Couche 2 : attributs statiques additionnels (infrastructure routière, panneaux…)
- Couche 3 : attributs dynamiques et temporaires (météo, état du trafic)
- Couche 4 : attributs très dynamiques provenant des autres véhicules et infrastructure de route proche. Ces attributs incluent ce que les autres nœuds du réseau ont détecté sur la route et l'environnement proche avec leurs propres capteurs.

3.3 Résultats de tests des communications véhicules - véhicules sur architecture SAFESPOT

Dans le cadre du projet SAFESPOT, Renault a procédé à des tests pour mesurer la performance des communications V2V entre deux véhicules démonstrateurs (Laguna, Espace), équipés de systèmes SAFESPOT avec des modems de communication WAVE. L'architecture SAFESPOT est implémentée sur chaque véhicule comme indiqué sur la figure 6.

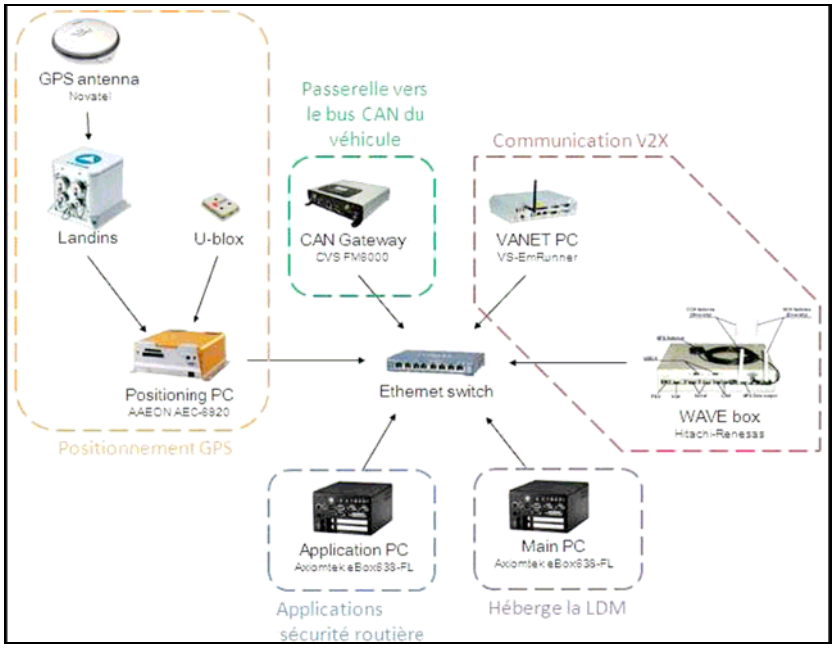


Figure 6 - Architecture matérielle des véhicules SAFESPOT

Environnement de test

Les tests ont été réalisés autour du Techno-centre de Renault à Guyancourt.

Cas d'usage n°1 : les véhicules sont en ligne de vue, un des deux véhicule est statique.

Cas d'usage n°2 : les véhicules arrivent à une intersection. Les résultats ne seront pas présentés ici.

Cas d'usage n°3 : les véhicules se croisent, séparés par une haie d'une hauteur arrivant au niveau des antennes des véhicules (grillage métallique+ arbustes).

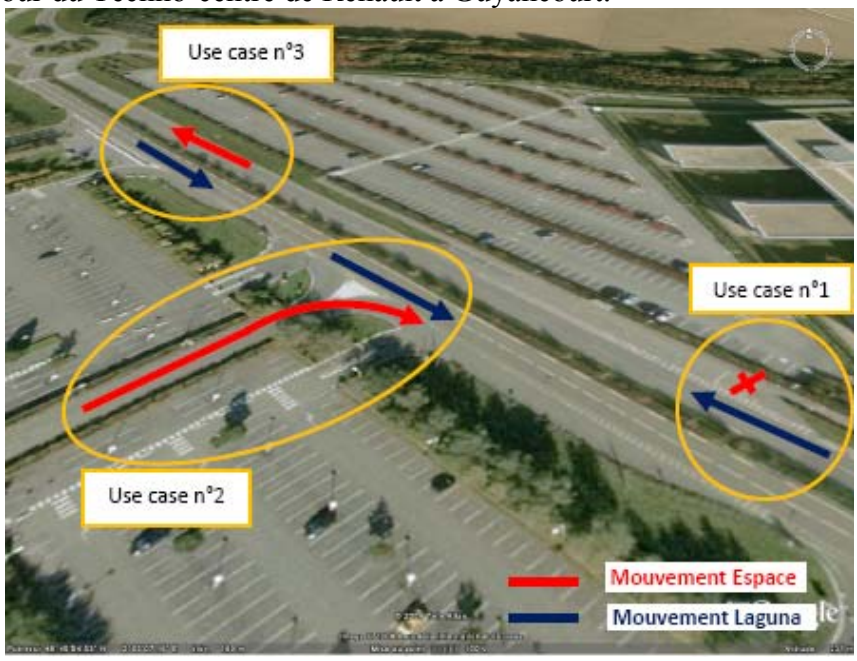


Figure 7 - Environnement des tests

Test en ligne de vue (Cas d'usage n°1)
Un véhicule (Espace) est statique l'autre (Laguna) roule à une vitesse moyenne de 30km/h puis 50 km/h. Le taux de perte de paquets se situe entre 4%, et 10%, la figure 8 représente le tracé de la Laguna relevé à partir des paquets reçu par l'Espace, l'absence de points du tracé est représentative des paquets perdus. La zone de couleur violette est celle ou le véhicule est en ligne de vue.

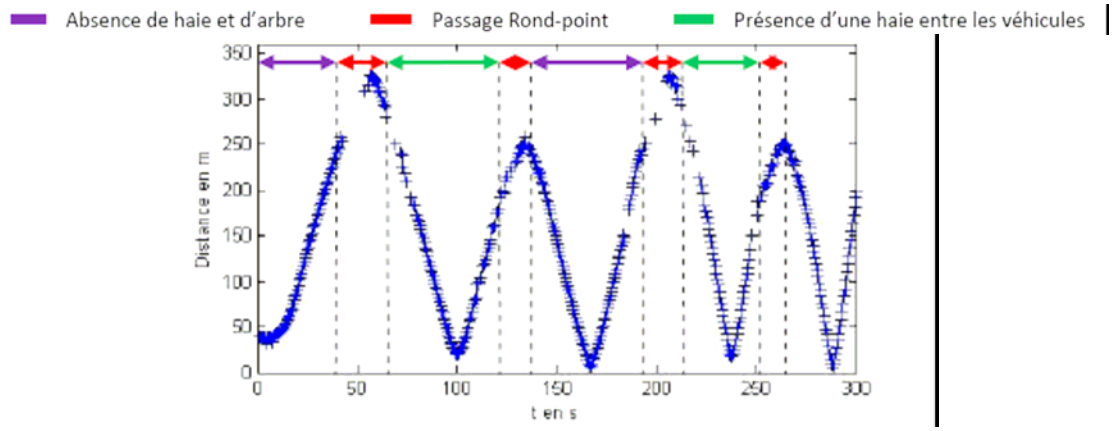


Figure 8 – Cas d'usage n°1_tracé du mouvement du véhicule entre les deux ronds points

Le taux de perte des paquets reste stable avec la distance. De même, ce taux est négligeable à 30km/h mais se situe autour de 10 % lorsque la vitesse atteint 50 km/h. Ceci peut s'expliquer par une compensation insuffisante de l'effet Doppler.

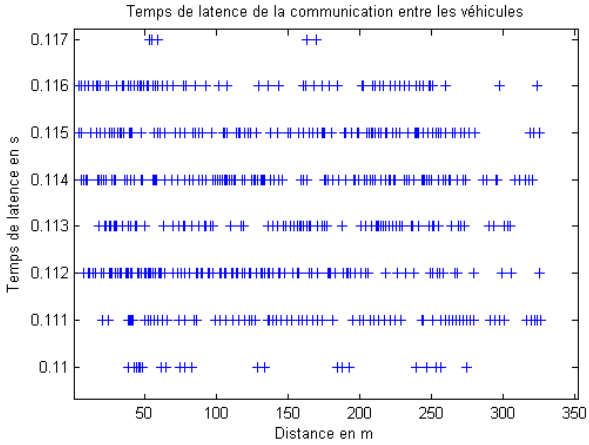
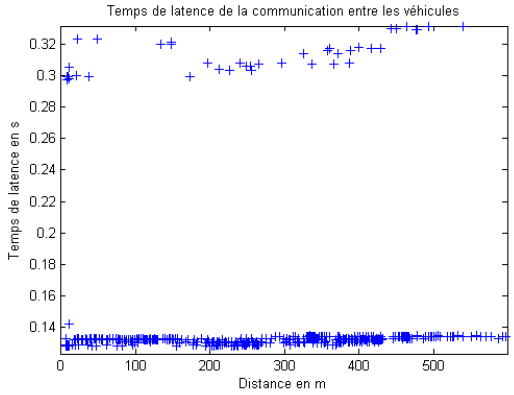


Figure 9 – Cas d'usage n°1_Délai en fonction de la distance

Le délai entre l'émission des paquets et leur réception ne dépend pas de la distance entre les deux véhicules. Il est de l'ordre de 0,11 s (Figure 9)

Test de croisement séparé par une haie (Cas d'usage n°3)
Les véhicules roulent à une vitesse moyenne de 50 km/h.



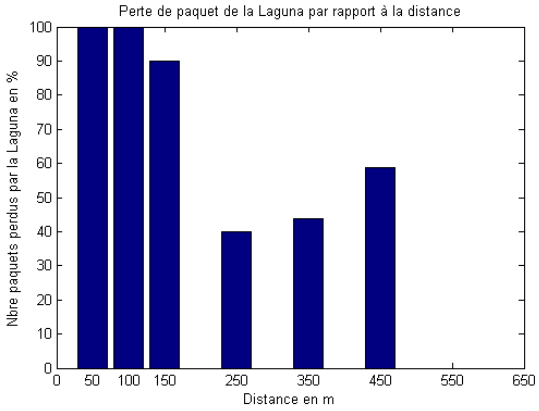


Figure 10 – Cas d'usage n°3_PER / distance **Figure 11 –** Cas d'usage n°3_Délai / distance

En phase initiale (inter-distance à 450 m) le taux de perte des paquets est à 60%. Il décroît à mesure que les véhicules se rapprochent malgré la présence de la haie de séparation, puis dès que les véhicules sont au niveau de la zone de croisement (inter-distance 150 m), le taux de perte monte brusquement à cause probablement de la perturbation de la haie centrale.

Le délai entre l'émission des paquets et leur réception ne dépend pas de la distance entre les deux véhicules. Il est de l'ordre de 0,13s. On remarque quelques pics autour de 0,3 s que l'on pourrait expliquer par les paquets ayant subi des retards à cause des réflexions (multi-trajet) lors du croisement.

3.4 Synthèse partielle des résultats des tests

Les précédents tests montrent certaines limites encore présentes avec les modems de communication WAVE actuels :
- La forte dépendance à l'environnement (milieu de propagation).
- L'évanouissement lié aux multi-trajets (Multipath fading) à améliorer avec une meilleure diversité des antennes de réception.
- L'effet Doppler pour les fortes variations de vitesses des véhicules à améliorer avec des techniques de compensation à coût raisonnable.

Cependant, certains résultats sont encourageants comme les délais entre l'émission et la réception des messages, les temps de l'ordre de 100 ms restent acceptables pour les applications de sécurité routières visées. De même la portée de 650 m atteinte lors de ces tests (jusqu'à 850 m en milieu dégagé) est largement suffisante pour recevoir les messages et anticiper un risque sur la route.

4. Conclusion : perspectives des systèmes coopératifs en France et en Europe

Dans la continuité des projets de recherche et expérimentations présentés ci-dessus et pour permettre la définition, la spécification et la standardisation, le déploiement et la commercialisation des systèmes coopératifs routiers, un consortium regroupant les partenaires identifiés sur la figure 12 ci-dessous a pu être constitué. Ce consortium s'est donné comme objectif de proposer et démarrer dès que possible une expérimentation en grandeur réelle de ces systèmes (SCORE-F : Système Coopératif Expérimental Français). Cette expérimentation des systèmes coopératifs routiers, de type FOT (Field Operational Test), a été proposée aux pôles de compétitivité MOV'EO et System@tic en novembre 2009 et a été labellisée par ceux-ci. Elle est maintenant proposée en réponse à l'appel d'offre FUI 9 pour décision de financement.

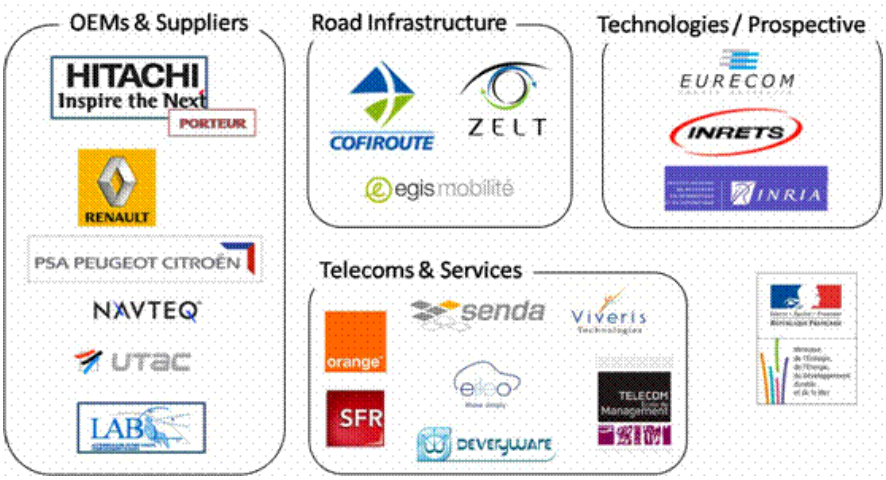


Figure 12 - Consortium SCORE-F

Dans l'hypothèse d'une acceptation du projet expérimental et de son démarrage rapide, SCORE-F sera pris comme référentiel français pour le montage d'un projet expérimental européen en réponse à l'appel d'offre n°6 du 7° PCRD de la Commission européenne incluant les FOT pour systèmes coopératifs routiers. Ce projet européen est en cours de montage et prend comme base le projet courant « PRE-DRIVE C2X » (http://www.pre-drive-c2x.eu). Une première approche au niveau du C2C-CC est de développer une coopération européenne autour de ce projet français et du FOT SIM-TD allemand (ciblant également les systèmes coopératifs routiers).

Dans un premier temps, ce projet expérimental SCORE-F se centrera sur l'expérimentation au niveau du réseau autoroutier Français en coopération avec COFIROUTE et sur les communications entre véhicules et infrastructure. Dans un second temps, il s'agira de développer un partenariat avec un ou plusieurs départements de l'Ile de France ou d'autres régions afin d'expérimenter ces nouveaux concepts et nouvelles technologies au niveau urbain, péri urbain et rural.

Références

- ETSI TR 102 698 (2008), Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communication; C2C-CC Demonstrator ; Use cases and Technical Specifications.
- ETSI ES 202 663 (2008), Intelligent Transport Systems (ITS); European profile standardization on physical and medium access layer of 5 GHz ITS.
- A.K. Mokaddem et al. (2008), "Global system reference architecture specification (D7.3.1)", SAFESPOT , www.safespot-eu.org
- A. Brakemeier et al. (2008), "Local dynamic map specification (D3.3.3)", SAFESPOT, www.safespot-eu.org

DIVAS : COMMENT ADAPTER DYNAMIQUEMENT LA DEMANDE A L'OFFRE DE SECURITE ROUTIERE

Diplômé de l'ENTPE en 2002, docteur en 2005 de l'Université de Saint-Etienne. Chercheur en vision par ordinateur appliquée aux systèmes de transports intelligents. Responsable du domaine « aides à l'exploitation des réseaux ».

Ingénieur civil des Ponts et Chaussées. Habilitation à Diriger les Recherche (HDR) de l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand. Responsable de la division « Entretien, Sécurité et Acoustique des Routes » du LCPC

Nicolas HAUTIERE
Université Paris-Est,
Laboratoire Exploitation Perception Simulateurs et Simulations,
UMR INRETS-LCPC, Paris, France

Philippe LEPERT
Université Nantes Atlantique,
Division Entretien Sécurité et Acoustique des Routes,
LCPC, Nantes, France

Résumé

Le projet ANR DIVAS, « Dialogue Infrastructure Véhicules pour Améliorer la Sécurité routière », élabore un concept global de système d'échange d'informations entre l'infrastructure et les véhicules, fournissant au conducteur, en temps réel, un indicateur intégré quantifiant sa propre sécurité le long d'un itinéraire. Cet indicateur prend en compte l'état de surface de la chaussée, les conditions météorologiques et la géométrie de la route. Le projet envisage le déploiement du système, en en examinant toutes les conséquences, tant en termes technologiques que sur les plans de la crédibilité et de l'acceptabilité de celui-ci. Un prototype permettant de démontrer les potentialités d'un tel système est en cours d'élaboration. Par rapport à d'autres initiatives similaires, le projet se concentre davantage sur le rôle des gestionnaires routiers dans le développement et le déploiement de tels systèmes. Cet article, expose le concept ainsi que les principales innovations du projet.

Mots-clés: systèmes coopératifs, sécurité routière, limitation de vitesse, accidentologie, adhérence, visibilité, trajectoires, acceptabilité, risque routier.

Abstract

The ANR project DIVAS, "Dialogue between Infrastructure and Vehicles for Advanced road Safety", is building a global concept of a vehicle – infrastructure information exchange system, providing the driver, in real time, with an integrated indicator about its own safety along a route. This indicator mainly takes into account the pavement surface conditions, the meteorological conditions and the road geometry. The project considers the system implementation, by examining all the consequences of this implementation, in terms of technology as well as acceptability and credibility. A prototype which specifically aims at demonstrating the potentialities of such an integrated system will be realized. Compared to other initiatives, the project is more focused on the role of the infrastructure and on the role of the road operators in the development and the deployment of such systems. This paper presents the concept as well as the main innovations of the project.

Keywords: Cooperative systems, road safety, speed limits, accidentology, road friction, visibility, trajectory, acceptability, highway risk.

1. Introduction

Dans 40 % des cas d'accidents mortels, on relève une vitesse inadaptée aux conditions de circulation. Proposer une vitesse adaptée au conducteur constitue donc un enjeu fort de sécurité routière. On considère généralement que la réduction d'un pour cent des vitesses moyennes conduit à une diminution de deux pour cent du taux d'accident et de quatre pour cent du taux d'accident mortel (SETRA/CETUR, 1992). Il existe des systèmes ISA (Intelligent Speed Alert) qui ont pour principale fonction de rappeler la limite de vitesse aux conducteurs (Ehrlich, 2009). En raison des problèmes de complétude, de cohérence et de mise à disposition des bases de données de vitesses légales qu'ils exploitent, ces systèmes affichent parfois des limites de vitesses incorrectes, voire peu crédibles. Par ailleurs, les limites de vitesses actuelles, qui sont fixes, n'incitent pas les conducteurs à adapter leur vitesse en cas de difficultés conjoncturelles liées, par exemple, aux conditions météorologiques ou aux conditions de circulation. L'adaptation et la personnalisation des limites de vitesse est une solution pour résoudre ce problème et améliorer le gain en sécurité procuré par les systèmes ISA (Carsten et Tate, 2005). Le développement de telles limites se heurte cependant à deux difficultés. Premièrement, le respect des limites de vitesse suppose que les usagers de la route soient conscients des risques qui les justifient. Deuxièmement, les limites de vitesse actuelles intègrent un certain risque de dépassement par les usagers. Or, aujourd'hui, avec l'introduction du contrôle automatisé, ce risque s'est modifié et les limites en vigueur sont donc moins adaptées.

Le sixième PCRD Européen a vu l'émergence d'importantes initiatives en matière de développement de technologies d'échange temps réel d'information entre les véhicules et l'infrastructure. Les projets intégrés SAFESPOT, CVIS et COOPERS visent tous trois à proposer des plateformes standardisées de télécommunications basées sur l'intégration de différents canaux de télécommunications (UMTS, IEEE 802.11p…) à même de remplir des fonctions de sécurité et de mobilité.

Le projet DIVAS (Hautière et Lepert, 2008) vise à construire et à proposer aux conducteurs des limites de vitesse crédibles, c'est-à-dire personnalisées et adaptées aux conditions de circulation. Pour cela, il tire parti d'une part des travaux récents menés dans différents projets PREDIT traitant de sécurité routière (ARCOS, RADARR, IRCAD, VIZIR…) qu'il prolonge, et, d'autre part, des solutions technologiques proposées dans les projets Européens en matière d'architecture et de télécommunications.

2. Le concept

Le concept du projet DIVAS repose sur l'équilibre entre l'offre et la demande de sécurité routière. L'offre résulte de l'état de l'infrastructure et de son environnement, tandis que la demande est une conséquence de la vitesse des usagers. En conditions nominales, c'est-à-dire pour un véhicule isolé, roulant par temps sec et clair, l'écart entre offre et demande constitue la marge de sécurité que s'octroie le conducteur. En conditions météorologiques dégradées, cette marge de sécurité diminue drastiquement si le conducteur conserve la même vitesse, à cause de la baisse de l'adhérence et/ou de la visibilité. Cette baisse, donc la variation de marge qu'elle engendre à vitesse identique, dépend à la fois des caractéristiques physiques de l'infrastructure routière (texture, tracé) et des conditions météorologiques (pluie, brouillard…). Les premières varient lentement dans le temps, les secondes sont, au contraire, susceptibles d'évoluer très rapidement. L'approche proposée dans DIVAS consiste à :

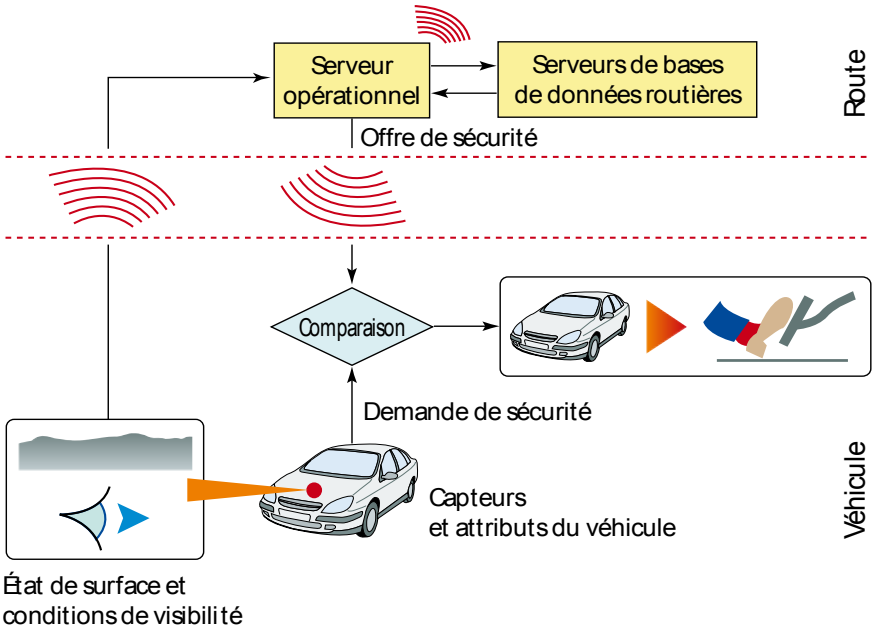


Figure 1 - Schéma du système de dialogue infrastructure véhicules proposé par DIVAS.

- relever, grâce à des appareils dédiés, les paramètres d'infrastructure variant lentement ;
- les stocker dans un serveur de bases de données routières ;
- les mettre à jour grâce à des modèles d'évolution ;
- les transmettre, après mise en forme, aux véhicules (grâce à un serveur opérationnel)
- les interpréter dans ces véhicules en les confrontant aux conditions météorologiques qui sont détectées par les capteurs embarqués.

Le projet DIVAS propose de calculer la variation de vitesse à conseiller au conducteur pour que sa marge de sécurité reste au niveau nominal. Il passe par le calcul d'un indice de risque prenant en compte les mécanismes d'accidents actuellement les plus fréquents. Le schéma de principe du concept DIVAS est présenté dans la figure 1.

Cette approche se différencie de celles existant par le recours à la notion de « vitesse de référence ». Trouver la variation à appliquer à cette vitesse de référence est plus aisé que de la déterminer entièrement. En effet, les modèles de calcul de risque, aussi complets soient-ils, ne reflètent que partiellement la réalité. La notion de vitesse de référence permet de prendre en compte, de manière empirique, cette complexité et ainsi, de ne faire porter l'erreur de modélisation que sur le calcul de la variation de vitesse. Ceci conduit à une erreur moindre en valeur absolue (Hautière et al., 2008). A travers cette description du concept DIVAS, on entrevoie les différents progrès techniques et innovations scientifiques apportées par le projet et détaillées dans la suite de l'article :

- la mise à jour des données d'accidentologie et la synthèse des différents mécanismes actuels d'accidents ;
- une réflexion ciblée sur la collecte et l'évolution temporelle des paramètres d'infrastructure ;
- des méthodes de relevé des trajectoires de référence ;
- une méthode de calcul de l'adhérence mobilisable ;
- des méthodes de détection des conditions atmosphériques à l'aide de capteurs embarqués (caméra ou lidar) sur véhicule ;
- une méthode de calcul de risque et de limites de vitesse.

3. Progrès techniques et innovations scientifiques

3.1 Une vision actualisée des mécanismes d'accidents

Dans un premier temps, le CETE Normandie - Centre a établi une liste des scénarios d'accident actuellement les plus fréquent, liste qu'il a approfondie dans la suite du projet, et qui a été soumise à l'ensemble des partenaires, qui ont pu la compléter ou l'amender. Ce travail a été suivi d'une étude des accidents sur autoroutes, basée sur la lecture des procès verbaux de 262 accidents corporels de la circulation survenus sur autoroutes interurbaines. Ces accidents ont ensuite été répartis selon 13 scénarios d'accidents prédéfinis. Les résultats obtenus à partir de ces 262 accidents ont été complétés par ceux obtenus sur une série d'accidents extraite de la base de données accidents d'ASF. Il ressort de cette étude que les accidents les plus fréquents sont ceux liés à un état de fatigue ou d'hypovigilance des conducteurs, à une manœuvre de dépassement ou à des chocs à l'arrière des véhicules les plus lents. Certains scénarios d'accidents ont une gravité plus importante que les autres, en particulier ceux impliquant un usager circulant à contresens. Certains scénarios et certains groupes d'accidents (par exemple les accidents impliquant un poids lourd) ont été étudiés plus en détail : quels types de véhicules sont impliqués ? Quelles sont les configurations des lieux ? Quel est le contexte de circulation ? Quelles sont les typologies et mécanismes d'accidents ? Les mêmes approches ont ensuite été mises en œuvre à partir des données disponibles sur les routes rapides urbaines et enfin sur les routes bidirectionnelles.

3.2 Actualisation des moyens de caractérisation de l'infrastructure

Moyens de collecte en site

Les travaux dans ce domaine ont commencé par le recueil exhaustif d'informations sur les appareils d'auscultation existant. Partant des lacunes mises en évidence par cette démarche, on a identifié les besoins de développement de nouveaux appareils, en l'occurrence pour estimer la texture des chaussées et la visibilité géométrique.

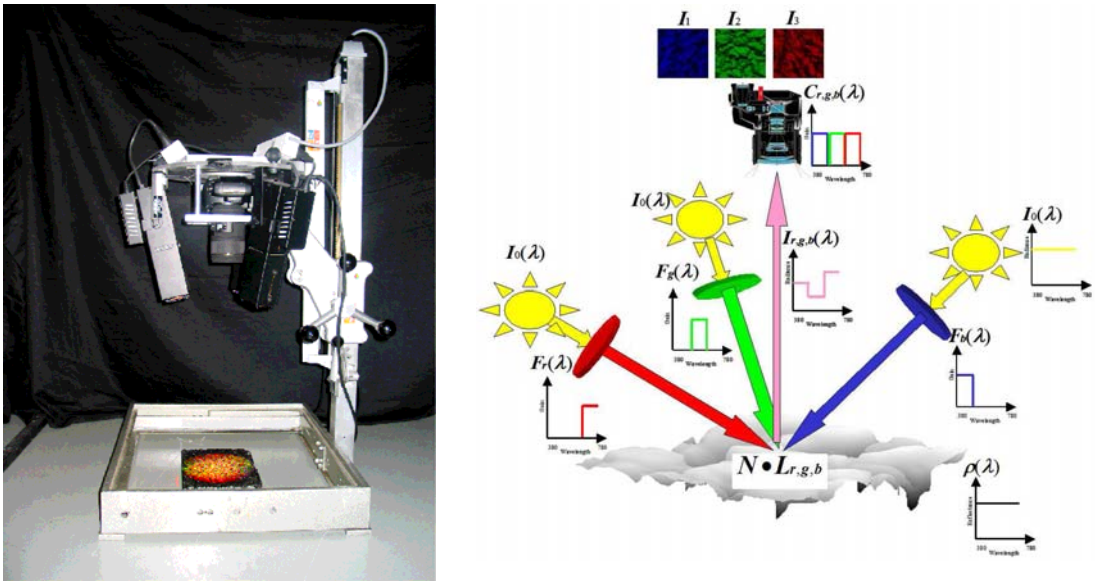


Figure 2 – Analyse de texture par stéréovision photométrique utilisant trois sources colorées à des angles différents et une seule caméra couleur (Bringier et al., 2008).

Actuellement, l'analyse de la rugosité d'une surface est effectuée principalement au travers de l'utilisation de capteurs à focalisation – de type laser – dont la transposition vers des systèmes embarqués à bord de véhicules d'usage courant n'est pas envisageable. On a donc recherché des pistes pour remédier à cette limitation. La première explore l'analyse d'images vidéo de texture. Le laboratoire SIC (Bringier et al., 2008) en a testé en laboratoire la faisabilité : les premiers résultats sont encourageants (Figure 2). La seconde piste, suivie par le LCPC, s'intéresse aux capteurs à rétrodiffusion d'ondes (acoustiques ou optiques) utilisés dans différents domaines. Elle s'est focalisée, à ce stade, sur une étude bibliographique très complète et une première modélisation.

En ce qui concerne la visibilité géométrique, des progrès notables ont été enregistrés par rapport aux résultats obtenus dans le projet PREDIT VIZIR, notamment en ce qui concerne la modélisation tridimensionnelle des routes. Ces progrès concernent l'évolution de la plate-forme LARA-3D d'ARMINES utilisée pour relever les données, l'amélioration de la localisation du véhicule, et l'analyse et de la modélisation des nuages de points qui permettent d'obtenir un modèle tridimensionnelle de la route. L'ensemble, qui permet désormais d'effectuer un calcul de la distance de visibilité géométrique, produit des résultats très cohérents avec ceux produit par l'outil VISULINE, développé par le LRPC de Saint-Brieuc.

Interpolation, extrapolation à partir des données de site

En parallèle de ces travaux, des modèles d'évolution temporelle de l'adhérence des chaussées et de la rétro-réflexion des marquages ont été évalués. Il s'agissait en particulier de regarder si ces modèles pourraient être implantés dans le serveur de base de données pour mettre à jour, sans relancer trop fréquemment les campagnes de site, les caractéristiques routières critiques pour la sécurité des usagers. Concernant l'adhérence, la faisabilité est démontrée, dans des limites qui sont bien identifiées. Concernant la rétro-réflexion des marquages, les conclusions de l'étude sont moins optimistes et montrent qu'il faut encore progresser dans la recherche.

Mise en forme des données

Pour mettre en forme les données de l'infrastructure et les transmettre aux véhicules sous une forme compréhensible, une solution cartographique CAORTO a été développée par ARMINES sur la base du standard libre OpenStreetMap. Ce type d'outil préfigure un SIG routier à plus grande échelle permettant aux gestionnaires routiers de rendre leurs bases de données interconnectables avec celle des cartographes et par la même avec les véhicules.

3.3 Relevé des trajectoires de référence

Mise en œuvre et extension d'observatoires de trajectoires

Le projet PREDIT RADARR avait permis de développer un observatoire de trajectoires (OdT) et de l'utiliser pour analyser les conditions d'entrée des véhicules sur trois sites difficiles. Dans DIVAS, cette base d'étude de cas a été élargie à sept autres sites, différents mais potentiellement dangereux (Figure 3a). Un bilan complet de la mise en œuvre de l'OdT sur ces sept nouveaux sites illustre l'exploitation des résultats de l'OdT, permettant d'en tirer une série de constats portant sur les vitesses pratiquées en virage. Prudemment, on retient que, malgré le fait que les résultats obtenus orientent clairement vers un lien unissant la vitesse au rayon de courbure, ce lien est encore difficilement modélisable par une formule (échantillon encore trop petit pour oser des généralisations). Une autre approche a donc été menée en parallèle, consistant à modéliser les trajectoires des véhicules en virage, à recaler le modèle sur les trajectoires relevées expérimentalement avec l'OdT et à tirer des conclusions plus générales. Les premiers travaux de cette approche ont conduit à développer une nouvelle méthode mathématique pour réaliser cette modélisation (Daucher et Koita, 2009).

Figure 3 – (a) Mise en oeuvre de l'observatoire de trajectoires du LCPC en virage; (b) observatoire de trajectoires par présence de vent (CSTB) sur la RD 45 (CG 44).

Par ailleurs, l'OdT a vu son usage étendu au suivi automatique des trajectoires de motos, par le LASMEA. Afin d'évaluer la précision des trajectoires estimées, le système a été testé sur plusieurs passages de moto, réalisés par le LCPC sur ses pistes d'essai. La moto était instrumentée d'un GPS. Les résultats obtenus par vision ont été confrontés avec succès aux trajectoires estimées par GPS. Ainsi, le système est maintenant capable de suivre en temps réel un nombre variable de véhicules dans le trafic réel, gérant les occultations inter véhicules (Bardet et al., 2009).

Enfin, une étude de l'impact des vents sur les trajectoires de véhicules, menée par le CSTB (Figure 3b), a conclu que, dans les conditions rencontrées lors des expérimentations, les sollicitations dynamiques liées aux rafales génèrent des variations d'accélération latérale et vitesse rotationnelle d'un ordre de grandeur équivalent à celles générées par les imperfections de la chaussée. Une approche quantitative basée sur l'angle de giration a permis d'estimer la déviation maximale de trajectoire à environ 10 cm pour les trois configurations les plus exploitables (60 et 80 km/h en sens "normal" et 80 km/h sens "retour"). Sans généralisation excessive, on peut considérer que pour les véhicules légers, le risque de déviation notable de la trajectoire (au-delà de 20 cm) sous l'effet du vent est très faible et uniquement significatif dans des conditions météorologiques exceptionnelles, et sur des sites remarquables (viaduc, sortie de tunnel).

Analyse des trajectoires pratiquées sur itinéraires

Une méthodologie fondée sur l'enregistrement du comportement de conducteurs de référence a été développée pour déterminer un profil de vitesse adapté à un itinéraire routier (Figure 4). Elle a été appliquée sur deux itinéraires de test choisis l'un dans le département des Côtes d'Armor (22), l'autre dans le département de Loire-Atlantique (44). Sur les itinéraires sélectionnés, on a enregistré, à l'aide du Véhicule d'Analyse du Comportement du Conducteur (VACC) du CETE Normandie-Centre, les profils de vitesse pratiquée par un conducteur soumis à différentes consignes (vous êtes pressés ; vous roulez normalement ; vous roulez très prudemment). On a également relevé, à l'aide de stations de trafic, la distribution des vitesses pratiquées en différents points des itinéraires pour recaler les profils de vitesse précédents.

En parallèle, un autocar de la société CAT (filiale de VEOLIA) a été équipé d'un système autonome d'enregistrement des paramètres de comportement (bus CAN, GPS). Ces informations ont parfois été enrichies, grâce à un système RT-Maps, d'images vidéo et de

descripteurs d'événements ou points de repère sur l'itinéraire. Les trajets de l'autocar le long d'un itinéraire commercial ont été enregistrés, et serviront notamment à dresser des profils de vitesse nominale.

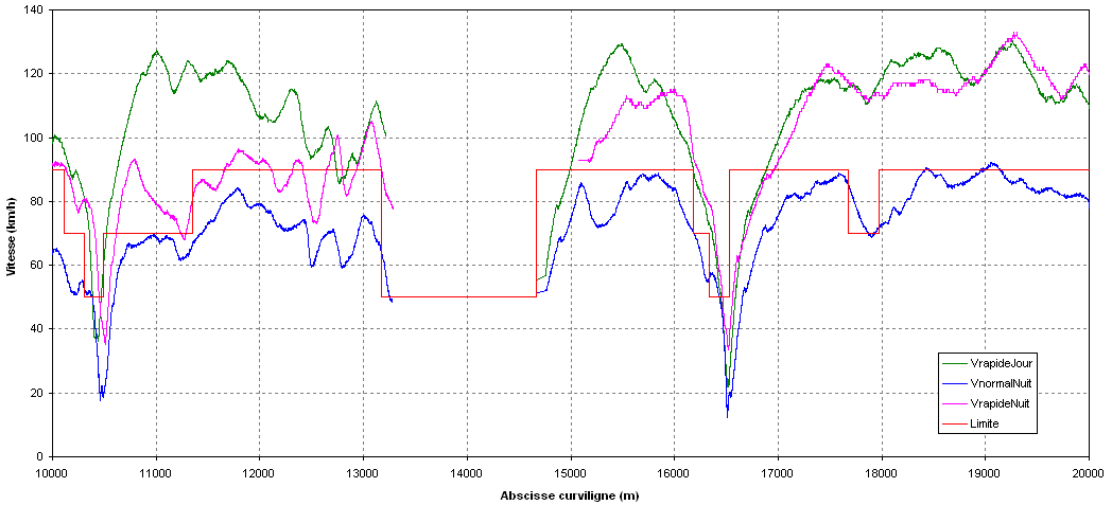


Figure 4 – Profils de vitesse sur itinéraires recueillis par le CETE Normandie-Centre selon différentes modalités sur la RD 786 (CG 22).

Enfin, le LEPSIS (INRETS-LCPC), qui dispose de scooters et motos dotés de capteurs endogènes (accéléromètres / gyromètres 3 axes, effet « hall » sur les roues AV et AR, codeur optique pour l'angle guidon, potentiomètre analogique sur le câble d'accélérateur, reprise du contact frein), a conduit une campagne de mesure sur un itinéraire du réseau routier de Loire-Atlantique avec une moto instrumentée (Honda 1000 CBF). Quatre aller - retour ont été effectués par deux conducteurs (un « expérimenté » et un « jeune conducteur »). Ils ont permis de proposer et de valider une méthode de reconstruction des trajectoires pratiquées par les motards.

Perspectives

Les informations produites par les capteurs dits bord de voie (OdT) et celles générées par les capteurs embarqués s'avèrent complémentaires et doivent être rapprochées. C'est ce que le CETE Normandie-Centre a entrepris. Le LCPC a aussi réalisé une expérience pilote en comparant, sur certains virages de Loire-Atlantique, les caractéristiques des trajectoires des conducteurs témoins obtenus d'une part par le VAAC, d'autre part par l'OdT.

3.4 Méthode de calcul de l'adhérence mobilisable

Accidents sur chaussées mouillées

Durant toute la durée de projet, on s'est efforcé de recueillir des informations plus complètes et plus fines pour caractériser l'impact sur l'adhérence, donc sur l'accidentologie, du mouillage de certains revêtements. L'objectif était clairement de réunir des informations très pertinentes pour améliorer les modèles d'adhérence (voir ci-dessous). On a donc recherché des portions de routes où l'adhérence paraissait à l'origine d'accidents constatés. La plupart des études s'accordant à dire que les problèmes d'adhérence se manifestent sur chaussée mouillée, l'hypothèse selon laquelle 'une zone d'accumulation d'accidents survenant lorsque la chaussée est mouillée est révélatrice d'un problème potentiel d'adhérence' a été retenue. Le recensement de ces sites a été réalisé notamment grâce à l'exploitation des Bulletins d'Analyse des Accidents Corporels (BAAC) de la circulation. La consultation des gestionnaires routiers concernés a ensuite permis d'exclure les sites dont le revêtement avait

été refait et les sites présentant des caractéristiques non compatibles avec des mesures sur terrain. Au final, douze sites ont pu être sélectionnés à ce jour. Des mesures très fines de texture ont alors été réalisées sur ces sites, par le LCPC et par Michelin, en vue de recueillir les informations nécessaires pour améliorer les modèles d'adhérence (voir ci-dessous).

Modèle d'adhérence pneumatique – chaussée
Michelin a tout d'abord procédé à une étude bibliographique approfondie des modèles disponibles, afin de situer leurs capacités et leurs limites, et ainsi de proposer un scénario apportant un net bénéfice vis-à-vis de l'état de l'art existant. Il a ensuite bâti un nouveau modèle (TaMeTirE) basé sur son savoir-faire. Ce modèle - qui sera enrichi jusqu'à la fin du projet – est fondé sur une prise en compte complète des mécanismes d'interaction gomme/sol en présence d'eau.

Approche de la hauteur d'eau sur les chaussées
Dans le projet PREDIT IRCAD, un modèle de mouillage des chaussées avait été développé. Ce modèle avait été partiellement validé en conditions très maîtrisées, notamment sur des planches de référence non circulées et dans un environnement isolé. Dans DIVAS, on s'est efforcé de simplifier ce modèle et de l'évaluer dans des conditions plus représentatives : chaussée circulée, revêtements variés, conditions météorologiques non maitrisées... La finalité de ce travail est de disposer d'un modèle exploitable permettant de prédire l'état de mouillage d'un itinéraire à partir des prévisions météo et en fonction d'une combinaison spécifique de paramètres routiers explicatifs tels la géométrie et l'environnement de la route.

Perspectives
Le rapprochement du modèle TaMeTirE proposé par Michelin et du modèle de calcul de hauteur d'eau proposé par le LCPC rend envisageable l'estimation, en temps réel, de l'adhérence mobilisable par les véhicules par le biais du dialogue infrastructure - véhicule. L'objectif est maintenant de pouvoir le mettre en œuvre et de démontrer ses performances sur site réel.

3.5 Détection des conditions de visibilité à l'aide de capteurs embarqués

Méthodes par traitement d'images
La visibilité mobilisable par un conducteur dépend de trois types de facteurs : la géométrie de la route, son équipement (type de chaussée, marquages,…) et les conditions météorologiques. Le projet PREDIT ARCOS avait déjà abordé la détection du brouillard diurne par caméra embarquée (Hautière et al., 2006). Pour progresser sur la thématique, le projet DIVAS a travaillé sur la détection de brouillard nocturne et la détection de pluie par caméra embarquée derrière le pare-brise du véhicule (Figure 5a).

La détection du brouillard nocturne exploite la complémentarité de deux méthodes : l'une qui consiste à utiliser la rétrodiffusion de la lumière des phares du véhicule équipé de la caméra ; l'autre qui se fonde sur la détection des halos entourant les sources lumineuses présentes dans l'environnement routier. Une méthode de traitement d'images a ainsi pu être proposée, qui permet d'isoler les sources lumineuses potentielles. Des critères permettant d'affirmer la présence de brouillard nocturne et de le caractériser ont été synthétisés (Gallen et al., 2009).

La pluie est détectée par la reconnaissance de gouttes d'eau sur le pare-brise, seule particularité visible dans les images prises par caméra embarquée. Un algorithme temps réel fondé sur des méthodes de traitement d'image bas niveaux a été proposé afin de localiser ces gouttes.

Figure 5 – Dispositif de détection des conditions de visibilité (a) par caméra embarquée derrière le pare-brise du véhicule et (b) par méthodes optiques.

Méthodes optiques

Un modèle analytique de rétrodiffusion de lumière, développé au LCPC (Taillade et al., 2008), permet de détecter le brouillard et d'estimer la distance de visibilité météorologique par temps de brouillard. Contrairement aux dispositifs classiques comme les transmissomètres, la méthode proposée ne nécessite l'accès qu'à un côté du volume de brouillard à caractériser, ce qui est, bien entendu, un avantage si l'on veut réaliser des mesures embarquées sur un véhicule. Lors des simulations conduites dans la chambre de brouillard du LRPC de Clermont Ferrand, il a été montré que le dispositif (Figure 5b) était peu sensible à la granulométrie des brouillards.

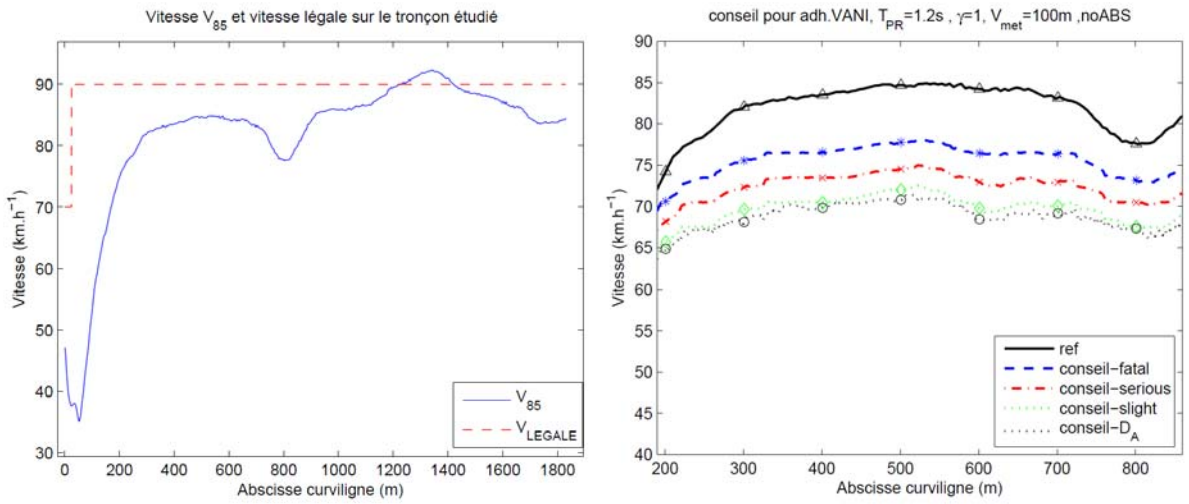
Perspectives

Différents brevets industriels sont en cours en préparation sur les méthodes développées. Le projet ANR ICADAC, lancé en 2009, se fonde en partie sur les travaux réalisés dans DIVAS.

3.6 Méthode de calcul de risque et de limites de vitesse

L'état de l'art sur les méthodes de calcul des vitesses de sécurité a permis de lancer une réflexion approfondie qui a débouché sur une méthode de calcul des vitesses adaptées à un itinéraire, selon les paramètres d'infrastructure et les conditions météorologiques. De ce calcul de vitesse sont déduites les recommandations à faire aux conducteurs (Daklallah et al., 2009). Dans les virages, le calcul de vitesse se fonde sur l'étude de la dynamique du véhicule et du comportement du conducteur. La méthode améliore un certain nombre de méthodes existantes dans la littérature en prenant en compte une description plus détaillée de l'infrastructure (Glaser et al., 2007). Pour optimiser ses paramètres, les données de l'OdT ont été mises à profit.

Dans les lignes droites, la méthode utilise les vitesses de référence mesurées par le VAAC. Elle consiste à maintenir constante la marge de sécurité du conducteur, marge qui est évaluée en calculant la gravité moyenne de chocs potentiels sur des obstacles fixes, suivant l'approche proposée par Richards et Cuerden (2009). Pour estimer la probabilité d'occurrence, les mécanismes d'accidents ainsi que leur répartition statistique, tels que proposés par le CETE Normandie-Centre, sont mis à profit (Figure 6).



(a) (b)

Figure 6 – Calcul proposé par le LCPC d'une vitesse de conseil par modulation (a) de la vitesse de référence calculée par le CETE Normandie-Centre permettant de maintenir la marge de sécurité du conducteur constante selon différentes modalités de calcul du risque. Exemple présenté en présence de brouillard (visibilité de 100 m).

4. Architecture et intégration

Architecture

Pour assembler ces différentes innovations en un système efficace, une architecture de communication véhicule - infrastructure, a été conçue par l'INRIA (Figure 7). Elle est composée de trois éléments qui sont :

- un serveur de base qui contient les paramètres bruts de l'infrastructure mesurés par différents appareils à grand rendement ; c'est, en fait, la base de données de l'opérateur ;
- un serveur opérationnel qui contient les données routières mises à jour et géolocalisées sous une forme compréhensible et interprétable par les véhicules ;
- un serveur embarqué dans les véhicules, connecté à la fois au serveur opérationnel et aux capteurs embarqués (bus CAN, caméra…).

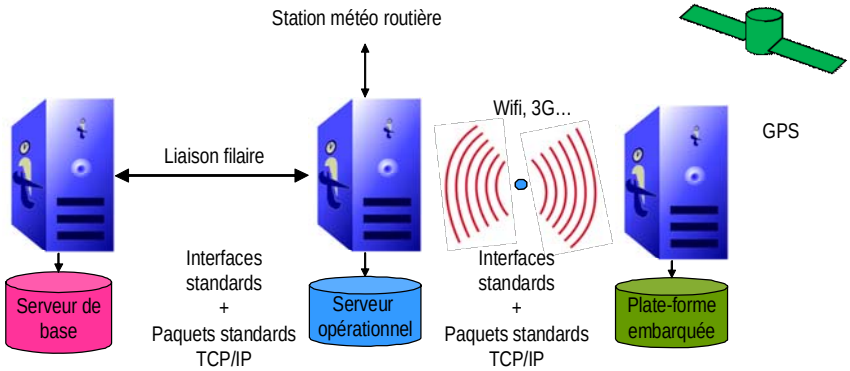


Figure 7 – Architecture d'échange d'informations conçue par l'INRIA dans le projet DIVAS.

Intégration

L'intégration de ce système a débuté, avec en point de mire des essais de démonstration sur le site fermé du LCPC à Nantes. Les spécifications fonctionnelles et les interfaces nécessaires

pour les développements des entités logicielles, matérielles et de leurs modes de communication ont été fixées. Ainsi, des solutions techniques sont d'ores et déjà proposées, en adéquation avec l'architecture fonctionnelle retenue. Le site de Nantes vient d'être complètement équipé et bénéficie de ce fait d'une couverture réseau sans fil intégrale, qui vient compléter la couverture UMTS existante.

5. Acceptabilité du système

Evaluation de la crédibilité du système
L'INRIA mène actuellement une étude sur l'acceptabilité, par des conducteurs professionnels, du système DIVAS. Cette étude s'appuie notamment sur des expérimentations réalisées sur un autocar de la CAT, filiale de VEOLIA, entre St Brieuc et Paimpol (22). Ce véhicule, en exploitation régulière, est équipé du système DIVAS. Les réactions des conducteurs professionnels aux recommandations du système seront analysées, ainsi que leur ressenti. A noter que, pour définir l'interface homme machine, le projet DIVAS s'est fondé sur les choix déjà faits dans les projets PREDIT ALZIRA et SAFEMAP, à savoir une alerte visuelle par un pictogramme associé au contexte précis.

Evaluation de l'acceptabilité juridique
L'acceptabilité juridique du système DIVAS par les gestionnaires de réseaux routiers fait l'objet d'une étude conduite par le LCPC, et associant la société ASF, le CG44 et la société d'assurance AXA. Celle-ci a apporté certaines précisions très utiles sur les conditions et les limites d'acceptabilité juridique de systèmes tels que celui conçu dans DIVAS. On a notamment été amené, à distinguer deux cas. Dans le premier cas, le gestionnaire se positionne en simple fournisseur de données vers un autre intermédiaire, qui en fera un service. Dans le second cas, le gestionnaire opère le service lui-même. On est alors assez rapidement amené à considérer que le gestionnaire ne peut apporter ce service que dans un cadre très réglementé. Il est aussi apparu très clairement que les termes des messages qui seront envoyés aux conducteurs seront tout à fait cruciaux et devront être soigneusement pesés.

6. Conclusion et perspectives

En se fondant sur les résultats de projets de recherche nationaux ou européens récents, le projet ANR DIVAS propose un dialogue entre les véhicules et l'infrastructure, permettant d'améliorer sensiblement la sécurité routière. Concrètement, ce dialogue permet de proposer aux conducteurs une vitesse limite personnalisée, adaptée aux conditions de circulation. Différents progrès et innovations scientifiques ont été accomplis en termes d'accidentologie, de collecte de données d'infrastructure, de relevés de trajectoires, d'estimation de l'adhérence et des conditions de visibilité atmosphérique. Le tout est à même de s'intégrer dans une architecture de système en cohérence avec les travaux européens en la matière, tout en gardant une indépendance vis-à-vis du standard technologique de communication. L'intégration du système est en cours. Les tests auront lieu au cours du premier semestre 2010 sur le site du LCPC Nantes pour des démonstrations finales à l'automne 2010. D'ors et déjà, il apparaît clairement que le rôle des gestionnaires routiers est fondamental dans une perspective de déploiement de tels systèmes. C'est pourquoi ils sont associés au plus près aux développements du projet.

Remerciements

DIVAS est un projet de trois ans qui a débuté en Mai 2007 financé par l'ANR et soutenu par le PREDIT. Le consortium est constitué de quatorze partenaires: LCPC, CETE Normandie centre, CETE Lyon, INRIA, ARMINES, CSTB, INRETS, Université de Poitiers, Université Blaise Pascal, MICHELIN, ASF, Conseil Général des Côtes d'Armor, Conseil Général de Loire-Atlantique, VEOLIA ENVIRONNEMENT. Le projet est labellisé par les pôles de compétitivité MOV'EO et PGCE.

Références

- Bardet, F., Chateau, T. and Lapreste, J. (2009), "Illumination aware MCMC particle filter for long-term outdoor multi-object simultaneous tracking and classification", in Proc. International Conference on Computer Vision, Tokyo, Japan.
- Bringier, B., Helbert, D. and Khoudeir, M. (2008), "Photometric reconstruction of a dynamic textured surface from just one color image acquisition", J. Opt. Soc. Am. (JOSA) A, 25, 3, pages 566-574.
- Carsten, O. and Tate, F. (2005), "Intelligent speed adaptation: accident savings and cost-benefit analysis", Accident Analysis and Prevention, 37, 407-416.
- Dakhlallah, J., Glaser, S., Mammar, S., Hautière, N. (2009), "A noval modular system for vehicle safe speed limit calculation", in Proc. ITS World Congress, Stockholm, Sweden.
- Daucher, D. et Koita, A. (2009), « Modélisation de trajectoires de véhicules de véhicules en virage par analyse de données expérimentales – application à la sécurité routière », dans Actes du XIXème Congrès Français de Mécanique (CFM'09), Marseille.
- Ehrlich, J. (2009), "Towards ISA deployment in Europe: State of the Art, main obstacles and initiatives to go forward", in Proc. Intelligent Speed Adaptation Conference, Sydney, Australia.
- Gallen, R., Hautière, N. and Dumont, E. (2009), "Static estimation of meteorological visibility distance in night fog with imagery", in Proc. IAPR Conference on Machine Vision Applications, Yokohama, Japan.
- Glaser, S., Nouvelière, L., Lusetti, B. (2007), "Speed limitation based on an advanced curve warning system", in Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Istanbul, Turkey.
- Hautière, N., Charbonnier, P., Dumont, E., Glaser, S. and Violette, E. (2008), "Improving the Credibility, and Compliance with, Speed Limits: a Real-World Approach", in Proc. Safe Highways of the Future, Bruxelles, Belgique.
- Hautière, N. and Lepert, P. (2008). "Dialogue between Infrastructure and Vehicles to Improve Road Safety: The DIVAS Approach", in Proc. Transportation Research Arena, Ljubljana, Slovenia.
- Hautière, N., Tarel, J.-P., Lavenant, J. and Aubert, D. (2006). "Automatic fog detection and estimation of the visibility distance through use of an onboard camera", Machine Vision Applications, 17, 1, 8-20.
- Richards, D. and Cuerden, R. (2009), "The relationship between speed and car driver injury severity", Transport Research laboratory, Department for Transport: London.
- SETRA/CETUR (1992), « Sécurité des routes et des rues ».
- Taillade, F., Belin, E. and Dumont, E. (2008), "An analytical model for backscattered luminance in fog : comparisons with Monte Carlo computations and experimental results", Measurement science & technology, 19, 5.

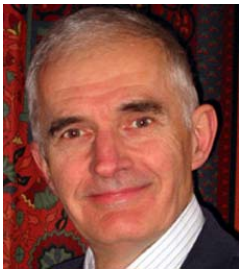
SESSION 4

Evaluation et acceptabilité des systèmes

Co-animateurs : Hélène Fontaine (INRETS)
et Ralph Engel (MEEDDM/DRI/PREDIT4)

ÉVALUATION DE L'ACCEPTABILITÉ ÉCONOMIQUE DES DISPOSITIFS SARI

Docteur ingénieur en chimie et associée du cabinet Erdyn. Chef de projet Erdyn dans le sous-projet AJISE de SARI, elle a également contribué à la rédaction du programme de travail du PREDIT 4 à travers le suivi de deux groupes opérationnels et à l'évaluation de l'impact de systèmes développés dans le cadre de PREVENT.



Depuis plus de 10 ans, Louis travaille dans le domaine de la sécurité routière. Directeur scientifique d'Erdyn, Il travaille notamment à l'élaboration des ébauches de modèles et au support de l'équipe en matière de méthodes et outils. Louis Drouot est ingénieur de l'École Centrale de Paris, et titulaire d'un Master of Science de l'Université de Californie à Berkeley.

Justine DEREGNAUCOURT **Louis DROUOT**

Erdyn Consultants
Paris, France

Résumé

Cet article présente une évaluation de l'acceptabilité économique des systèmes développés sur les sites pilotes, dans le cadre des expérimentations menées par les différents thèmes techniques, IRCAD, RADARR et VIZIR. Après avoir défini l'acceptabilité économique des solutions SARI, on rappelle chaque phase du raisonnement mis en place et détaille certaines d'entre elles : les données microéconomiques relatives aux dispositifs développés par exemple. Sur la base des travaux des thèmes techniques, l'impact de l'installation du dispositif sur site est évalué, quantifié et monétarisé. L'ensemble des données nécessaires à la mise en place du calcul économique est rassemblé pour alimenter le modèle et évaluer le ratio bénéfices sur coûts actualisé : une valeur supérieure à 1 indique un investissement rentable du point de vue de la collectivité, sous les nombreuses hypothèses faites. Les résultats pour les différents dispositifs SARI sont présentés et discutés. Enfin les conditions de déploiement des dispositifs sont discutées, par une étude de leur coût et de leur potentiel de marché.

Mots-clés : acceptabilité économique, rentabilité, taux d'actualisation, ratio bénéfice sur coût, déploiement, modèle de Nilsson, sécurité routière

Abstract

This paper presents an economic acceptability assessment of systems developed on pilot sites, within the framework of experimentations led for each technical theme, IRCAD, RADARR and VIZIR. After defining the economic acceptability of SARI solutions, each stage of the method implemented is presented and some are detailed: for instance, the microeconomic data of the device developed. Based upon developments and results for each technical theme, the impact of the device implementation is assessed, quantified and valued. All the data required in order to implement economic calculation is collected to feed the model and evaluate the discounted benefit/cost ratio: a value greater than 1 means a profitable investment for the community, under the numerous hypotheses made. The results for the different SARI devices are presented and discussed. Finally, conditions for devices implementation are discussed, according to their cost and market potential.

Keywords: economic acceptability, profitability, discount rate, benefit/cost ratio, implementation, Nilsson model, road safety.

1. Définition et démarche

1.1 Définition de l'acceptabilité économique

SARI a défini plusieurs « acceptabilités » susceptibles d'être étudiées dans le cadre du projet, dont *l'acceptabilité économique*. Celle-ci se fonde pour l'essentiel sur un calcul de rentabilité utilisant les outils classiques du calcul économique. On n'oubliera pas cependant qu'au-delà de la simple rentabilité économique, d'autres critères de nature économique ou financière conduisent les acteurs concernés à décider ou non de réaliser un investissement, notamment : montant de l'investissement, conditions de financement, taux d'endettement. Voilà qui distingue la rentabilité économique *stricte* de l'acceptabilité économique, plus globale. La démarche présentée se fonde sur un calcul de rentabilité économique qu'elle enrichit.

L'acceptabilité économique (Lebègue 2005, Maurice 2007, METLTM 2005, Peaucelle 2000) vise à constater la pertinence des flux financiers nécessaires ou consécutifs au déploiement à grande échelle des solutions expérimentées dans les différents thèmes SARI, du point de vue des différents acteurs concernés. Le mérite de cette définition est d'être synthétique et applicable à tous les acteurs. En pratique, elle se décline avec des outils classiques, selon les principales catégories d'acteurs :

- du point de vue individuel, on la traduit par la somme qu'une personne est prête à payer pour réduire la dangerosité d'un carrefour déterminé : c'est le consentement à payer ;
- du point de vue industriel, elle dépend de plusieurs critères d'analyse économique classique (marge brute, dividendes, taux de rentabilité interne), mais aussi de la valeur qu'une entreprise donne à son image, cette estimation pouvant être chiffrée en fonction des dépenses consenties (campagnes d'information, R&D) ;
- du point de vue collectif, l'acceptabilité économique découle des choix budgétaires et de l'équilibre entre dépenses immédiates et futures (taux d'actualisation), articulés avec les points de vue individuel (taxes, fiscalité, péages) et industriel (taux des financements).

Grâce à ces articulations, l'évaluation de l'acceptabilité économique collective au moyen des outils du calcul économique intègre de facto les points de vue individuel et industriel.

1.2 Evaluation de l'acceptabilité économique des dispositifs SARI sur sites expérimentaux : démarche

La première étape est l'identification systématique et exhaustive de l'ensemble des flux financiers caractéristiques de la « solution » en cours d'expérimentation. Les flux financiers qui nous intéressent appartiennent globalement à trois catégories :

- flux directs de type « investissement », principalement caractérisés par trois paramètres : montant, durée de vie et mode de financement ;
- flux directs de type « exploitation et maintenance », principalement caractérisés par trois paramètres : montant annuel, relations de dépendance, et ressources et emplois ;
- flux indirects de type « externalités » : dépenses collectives de santé « évitées » par la mise en œuvre du dispositif par exemple.

La complexité de la démarche et les risques d'erreur ne doivent pas faire renoncer : il est toujours utile de caractériser les externalités, sous réserve de préciser clairement les hypothèses de travail, les limites du raisonnement, les sources d'erreur, la marge d'incertitude, les compléments d'étude qui seraient utiles pour améliorer l'évaluation. De manière classique, la prise en compte des externalités peut notamment se faire grâce à un « signal économique » incitatif (prime) ou dissuasif (pénalité). Un exemple aujourd'hui classique dans le domaine de la sécurité routière est celui du « bonus » systématique accordé

par certaines compagnies d'assurance aux conducteurs de sexe féminin, statistiquement moins « accidentogènes » que les hommes.

Plus globalement, la démarche mise en œuvre dans l'évaluation de l'acceptabilité économique des dispositifs développés dans le cadre du projet SARI est schématisée à la figure 1.

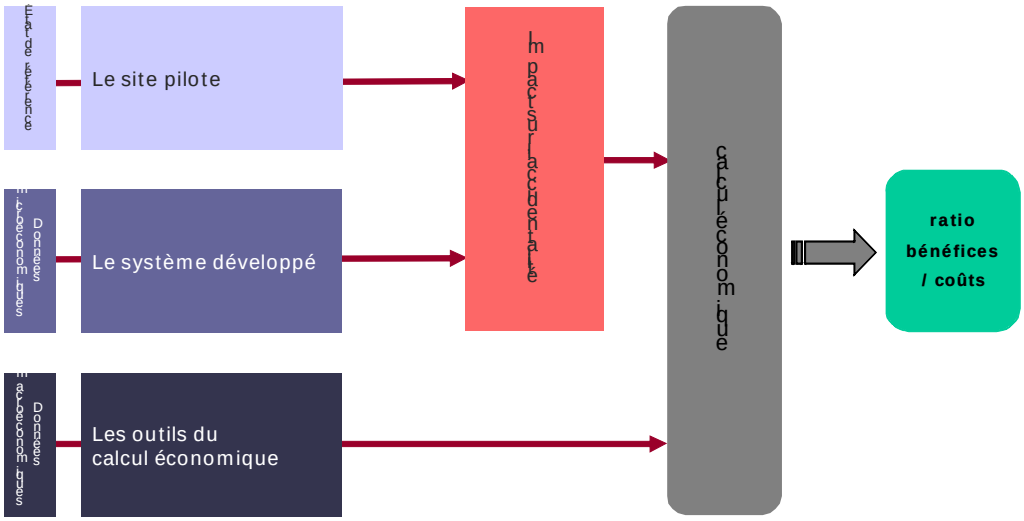


Figure 9 - Démarche mise en œuvre.

Nous avons choisi d'illustrer ici la démarche menée pour l'ensemble des systèmes développés dans le cadre de SARI par l'analyse de l'un des dispositifs, celui d'IRCAD, sur le site de Binic Saint-Quay Portrieux, tandis que les résultats sont présentés pour l'ensemble des dispositifs. Nous développons ici plus particulièrement[1] :

- les données microéconomiques relatives aux systèmes développés (coût des dispositifs) qui viendront alimenter le modèle ;
- l'évaluation et la quantification des externalités ;
- l'évaluation économique des dispositifs : ratio bénéfices / coûts.

2. Données microéconomiques : coûts associés au système développé par IRCAD pour le site de Binic Saint-Quay

On présente ici les 3 scénarii faisant référence à des dispositifs de plus en plus simples[2] :
- systèmes expérimentaux ;
- systèmes à bas coût ;
- systèmes à très bas coût.

Ces trois scénarii conduisent à des coûts de possession sur 10 ans (taux d'actualisation de 4%/an) de 134, 80, et 49 k€ (tableau 1). On attire l'attention sur le fait que le coût de

1 Pour plus de détails, i.e. pour connaître le détail de l'ensemble des hypothèses de travail non décrites ici (état de référence, rappel des outils indispensables du calcul économique,...), on se reportera *avantageusement* au livrable SARI correspondant (2.12.5 & 2.12.6).

2 Le thème a travaillé pour développer des systèmes à plus bas coût que ceux utilisés spécifiquement pour les expérimentations. Ces systèmes à plus bas coût sont nettement plus simples que ceux développés spécifiquement pour les expérimentations mais aussi efficaces dans leur fonction de diagnostic et d'alerte à l'usager. La principale différence réside dans le fait que les systèmes voués au déploiement (et donc à l'industrialisation) n'ont pas besoin de permettre la sauvegarde d'informations, indispensable en phase d'expérimentation mais inutile en fonctionnement usuel.

possession du dispositif relatif au scénario 3 pourrait être moindre si le dispositif était fabriqué en plus grande série, par exemple à 500 exemplaires. On peut raisonnablement poser que le coût de l'équipement en lui même pourrait être divisé par 2 (les coûts d'installation restant constants).
Dès lors, le coût de possession sur 10 ans du scénario à bas coût (scénario 3), dans le cadre d'une fabrication en série du dispositif s'élèverait à 30 k€.

Tableau 4 - Coût de possession des dispositifs IRCAD sur 10 ans (taux d'actualisation 4%/an) (Aron 2009, Deregnaucourt 2009)

	coût unitaire (k€)	nombre d'élément(s)		
		scénario 1	scénario 2	scénario 3
station météo	15	1		
capteur d'eau	15	1	1	
capteur d'eau bas coût	1,5			1
boucle	1,5	3		
analyseur	1,5	3		
PMV	6	2	2	2
système contrôle commande	3,5	2	2	2
RADAR	0,5		1	1
total équipement (k€)		58	34,5	21
frais GC (k€)		29	17,25	10,5
total investissement (k€)		87	51,75	31,5
exploitation annuelle (k€)		5,8	3,45	2,1
coûts de possession sur 10 ans (k€)		134	80	49

3. Évaluation et quantification des externalités : impact des systèmes sur l'accidentalité

L'évaluation directe de l'impact d'un dispositif SARI sur l'accidentalité locale à l'endroit de son installation est théoriquement concevable, mais en pratique irréaliste : modestie des flux de circulation, accidentalité composée d'évènements rares sans valeur statistique, impossibilité d'engager une campagne d'observation pluriannuelle, etc. Dans ces conditions, la méthode généralement retenue consiste à estimer l'impact au travers de la mesure des vitesses des véhicules et de leurs variations. Ce choix est notamment justifié par le fait que la vitesse est un paramètre majeur et bien connu de l'accidentalité.

3.1 Choix du modèle

Depuis les travaux de Nilsson (1982, 2004), on dispose de lois empiriques (SWOV, 2006 ; Taylor 2000) mais satisfaisantes reliant un écart de vitesse moyenne avec la variation de probabilité d'accident (tous accidents corporels, accidents graves ou mortels, accidents mortels). Depuis sa présentation initiale en 1982, le modèle de Nilsson a été abondamment commenté et discuté. Ses principaux atouts sont les suivants :

- le modèle se fonde sur une réalité physique : en effet, on peut poser en première analyse que la gravité d'un accident est proportionnelle à la quantité d'énergie cinétique mise en jeu, qui varie par construction comme le carré de la vitesse. En posant dans son modèle que le risque (ou la fréquence) des accidents varie comme le carré du rapport des vitesses (tous accidents confondus), Nilsson transpose cette réalité physique dans son modèle ; en outre, les analyses statistiques des données d'accidentalité disponibles confirment la pertinence de ce choix ;
- la simplicité du modèle et son évidence plaident pour lui. Dans un monde d'analyses scientifiques approfondies qui oscille entre complexité des équations et incertitude majeure des valeurs numériques, le modèle de Nilsson propose un compromis élégant qui contribue à son succès.

Aujourd'hui, le modèle de Nilsson correspond à l'état de l'art en matière de modélisation de la fonction de risque routier liée à la vitesse. Les modèles plus récents comme ceux d'Elvik, Finch ou Taylor sont des variantes qui confirment de fait la pertinence du modèle de Nilsson : ainsi l'ONISR (2006) choisit-il de l'utiliser pour évaluer l'impact du CSA.

Le modèle de Nilsson conduit aux relations illustrées à la figure 2 et aux estimations suivantes des effets du changement de la vitesse moyenne sur le nombre d'accidents mortels, le nombre d'accidents mortels et graves et le nombre d'accidents corporels :

$$AC_2 = AC_1\left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2 \qquad AGM_2 = AGM_1\left(\frac{v_2}{v_1}\right)^3 \qquad AM_2 = AM_1\left(\frac{v_2}{v_1}\right)^4$$

AC tout accident corporel
AGM accident grave ou mortel
AM accident mortel

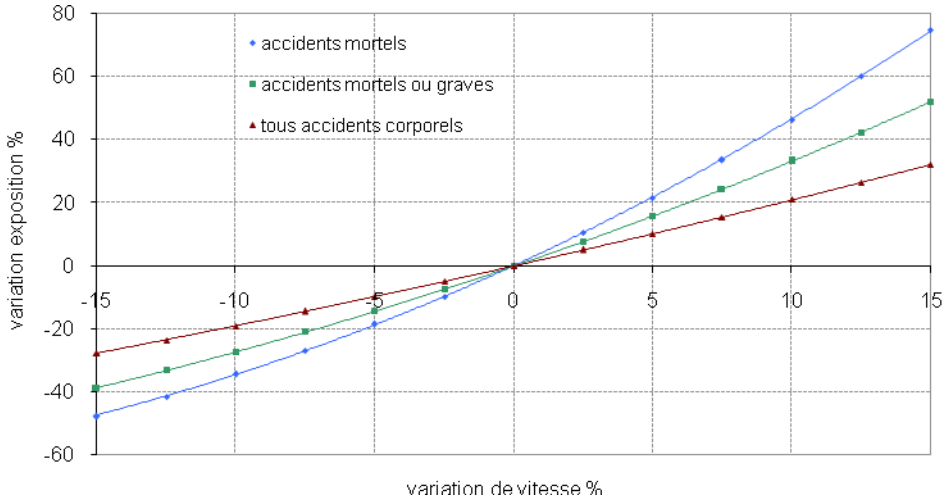


Figure 10 - Modèle de Nilsson

3.2 Évaluation du dispositif IRCAD sur le site de Binic Saint-Quay Portrieux

Le dispositif présenté a été testé expérimentalement par les thèmes techniques en 3 phases :

- la phase 1 est la référence, le système n'est jamais déclenché ;
- la phase 2 d'alerte générale au cours de laquelle le système est déclenché par état d'adhérence dégradée, quelque soit la vitesse de l'usager ;
- la phase 3 d'alerte individuelle non ciblée au cours de laquelle le système se déclenche par état d'adhérence dégradée et vitesse excessive. Une phase 3bis alertera l'usager individuellement et de manière ciblée par un message personnalisé (plaque d'immatriculation).

On présente ici les résultats obtenus au cours des phases 1 & 2[3], extraits des travaux menés par le CETE Normandie Centre (Violette, 2009). La figure 3 montre l'impact de la mise en marche du dispositif en phase 2 par temps mouillé sur la vitesse pratiquée par les usagers. Ce travail a été répété pour l'ensemble des conditions (phase 1/phase 2, temps sec/mouillé, période de la journée). Globalement, la mise en marche du dispositif permet une diminution de la vitesse moyenne de près de 7 % par rapport à la phase 1.

3 Les résultats expérimentaux obtenus au cours de la phase d'alerte individuelle ne permettent pas de conclure quant à l'impact du dispositif sur le comportement des usagers dans ces conditions. On se reportera au livrable d'IRCAD SARI/IRCAD/CETENC/L9.4.1 pour plus de détail. Par conséquent ce scénario ne fait pas l'objet d'une analyse de l'évaluation économique.

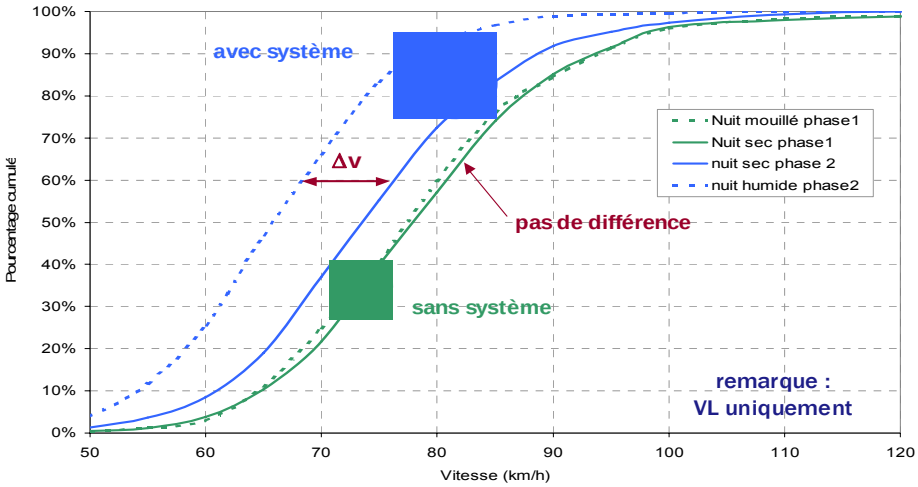


Figure 3 - Comparaison des vitesses pratiquées la nuit au cours des phases 1 & 2, par temps sec et temps mouillé

Selon le modèle de Nilsson, cela correspond à une diminution de 25 % d'être impliqué dans un accident mortel. Ceci nous permet de connaître l'exposition au risque par km (tableau 2a).

Pour achever le raisonnement, il faut aussi poser une hypothèse sur la *rémanence* de l'impact du dispositif. Nous choisissons de retenir que la modification des comportements des usagers se prolonge 3 km en aval du dispositif : il s'agit d'un choix fort, mais motivé par les observations faites dans le cadre du contrôle sanction automatisé.(ONISR, 2006) On pose ainsi l'hypothèse que la réduction de vitesse instantanée observée au niveau du dispositif diminue linéairement sur une distance de 3 km pour finalement s'annuler. Dans ces conditions, le dispositif installé entre Binic et Saint-Quay conduit à une diminution individuelle de l'exposition au risque comme indiquée au tableau 2b.

Tableau 2 - Diminution de la probabilité d'implication dans un accident (a), et de l'exposition au risque (b).

(a)

diminution relative de la probabilité d'être (impliqué dans), par km (en %)			
accidents corporels	- 13 %	blessé léger	- 11 %
accidents graves ou mortels	- 19 %	blessé hospitalisé	- 24 %
accidents mortels	- 25 %	Tué	- 32 %

(b)

diminution de l'exposition au risque, probabilité d'être (impliqué dans), par km (en km^{-1})			
accidents corporels	$-4{,}638.10^{-09}$	blessé léger	$-3{,}044.10^{-09}$
accidents graves ou mortels	$-5{,}156.10^{-10}$	blessé hospitalisé	$-8{,}453.10^{-09}$
accidents mortels	$-1{,}084.10^{-09}$	tué	$-2{,}254.10^{-09}$

4. Evaluation économique des dispositifs : ratio bénéfices/coûts

Dans ce qui précède, on a choisi de mettre l'accent sur les aspects spécifiques de la méthode d'évaluation de l'acceptabilité économique, notamment l'emploi du modèle de Nilsson et ses conditions de mise en œuvre. Pour être complet, il faut en outre signaler que l'évaluation de l'acceptabilité économique implique aussi le recueil des vitesses sur site (mis en œuvre par les

thèmes techniques) (Violette, 2009) et l'évaluation de l'exposition au risque (statistiques d'accidentologie) (Deregnaucourt 2009, ONISR 2007 et 2008).

4.1 Résultats de l'évaluation de l'acceptabilité économique des dispositifs SARI sur sites expérimentaux

Les résultats présentés sont conditionnés par de nombreuses hypothèses. Ainsi, le tableau 3 donne seulement pour chaque site le ratio bénéfices sur coûts actualisés (BCA) correspondant à un lot nominal de conditions, pour l'ensemble des systèmes développés dans SARI.

Tableau 3 - Ratio BCA pour les hypothèses citées - IRCAD

IRCAD – Binic – Saint-Quay Portrieux

scénario de coût	fabrication	rémanence	TMJA VP	TMJA TC	taux d'occupation VP	taux d'occupation TC	ratio bénéfices / coûts
3	unitaire	3	4300	15	1,32	20	0,73
3	en série	3	4300	15	1,32	20	1,20

Taux d'actualisation : 4 % /an ; le scénario de coût fait référence au tableau 1 ; rémanence exprimée en km ;

Ce travail peut être dupliqué pour les autres thèmes techniques ; selon le même principe, on aboutit aux résultats suivants :

Tableau 4 - Ratio BCA pour les différents thèmes techniques (Briand 2008, Jégou 2009, Violette 2008 & 2009, Yahiaoui 2009, Guye 2009)

fabrication	IRCAD-Binic	IRCAD – St Michel	RADARR – Guingamp Bourbriac	VIZIR -Goudelin
unitaire	0,73	0,16	4,13	1,09
en série	1,20	0,27	6,48	> 1,09

Taux d'actualisation : 4 % /an

Ce tableau permet de tirer quelques conclusions simples, caractéristiques des systèmes étudiés par les thèmes techniques, et donc susceptibles de leur fournir des pistes d'amélioration ou de validation. Ainsi le dispositif RADARR semble-t-il bénéficier d'une excellente rentabilité : ce résultat est-il générique ou lié au site expérimental ? Le dispositif IRCAD semble dans tous les cas avoir du mal à trouver sa rentabilité : peut-on envisager d'améliorer ces résultats en modifiant le dispositif étudié ? Le dispositif VIZIR est peut-être dans une situation analogue à celle du dispositif IRCAD, mais des expérimentations complémentaires seraient nécessaires.

Une étude de sensibilité du modèle à certaines données d'entrée a été menée. L'objectif est de qualifier les hypothèses, en voyant dans quelle mesure un écart par rapport à une valeur de référence impacte le ratio bénéfices sur coûts. Les paramètres auxquels le modèle est le plus sensible sont les données de trafic et de taux d'occupation pour les véhicules particuliers et l'hypothèse posée sur la rémanence des effets du dispositif sur le comportement de l'usager. La sensibilité du modèle à ce dernier paramètre laisse penser qu'un travail en profondeur par des équipes de recherche travaillant le domaine des sciences humaines et sociales sur cette question de rémanence pourrait apporter beaucoup :

- tant d'un point de vue fondamental ;

- que pour identifier les leviers susceptibles d'allonger la distance en travaillant sur les dispositifs notamment et leur acceptabilité individuelle et sociale.

Par ailleurs, n'oublions pas l'impact du coût du dispositif que nous abordons plus loin dans cet article.

4.2 Déploiement : coût des systèmes et potentiel de marché

La dimension industrielle liée à la fabrication en série du dispositif est un paramètre clé pour l'acceptabilité économique. La fabrication du dispositif en série, dans le cadre de commandes groupées ou de marchés cadre, permet d'augmenter significativement la rentabilité économique des dispositifs en pesant sur les coûts de production.

Une ébauche méthodologique pour contribuer à l'analyse du potentiel de marché des solutions SARI a été posée. Le ratio bénéfices/coûts actualisés constitue un indicateur de choix pour relier le déploiement des dispositifs à leur impact sur l'accidentalité puis à leur potentiel de marché.

Par exemple, combien de zones présenteraient un ratio bénéfices sur coûts supérieur à 1 en cas d'installation d'un dispositif IRCAD ? L'évaluation du marché potentiel IRCAD doit aussi tenir compte du fait que la réduction du risque dans les virages concernés peut passer par différentes solutions techniques : installation d'un dispositif IRCAD, réfection de la chaussée, installation d'un rail latéral, reprofilage du virage, etc. Ces différentes solutions sont de fait en concurrence et doivent être évaluées selon plusieurs critères : réduction du risque, mais aussi : coût de possession total, durée de vie, synergies avec d'autres opérations programmées sur le réseau routier, etc. Ainsi, seule une fraction du potentiel de marché global serait, dans ces conditions, accessible aux solutions SARI (figure 4).

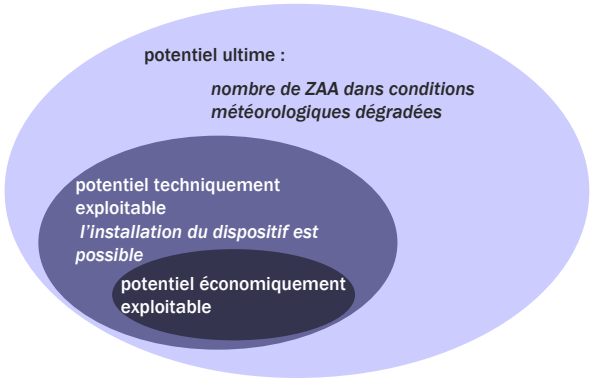


Figure 4 – Potentiel de marché des solutions SARI.

Par ailleurs, le potentiel de marché économiquement exploitable varie directement avec le coût des dispositifs. Selon la synthèse des points de vue exprimés par les thèmes techniques et par AJISE, un potentiel de marché national économiquement exploitable de l'ordre de 500 à 1000 dispositifs paraît réaliste. Bien entendu, les choix politiques en termes de stratégie de commandes groupées auront un impact direct sur la rentabilité des dispositifs.

5. Conclusion

Des différences de rentabilité en fonction des systèmes développés

Les ratios observés pour les dispositifs sont variables en fonction des thèmes et des sites étudiés. Pour IRCAD le ratio B/C est supérieur à 1 dans le cas de l'installation d'un système

dépouillé techniquement et fabriqué en série pour Binic, le ratio bénéfices sur coûts reste bien plus faible dans le cas de Saint-Michel en Grève. Ce constat n'est pas surprenant à la lecture du faible impact du système sur le comportement des usagers pour ce site : ceci amène un commentaire important sur le choix des sites à équiper dans le cadre du déploiement des dispositifs. Pour RADARR, le ratio bénéfices/coûts est supérieur à 1, dans le cadre des hypothèses faites.

De la nécessité de poser des hypothèses …
Il est important de noter que dans certains cas, les données sources sont difficilement accessibles directement : dès lors, il s'agit de travailler à leur estimation, sous réserve de préciser clairement les hypothèses de travail, les limites du raisonnement, les sources d'erreur, la marge d'incertitude… Dans cette optique, nous avons présenté une étude de sensibilité du modèle à différents paramètres clés. L'un d'eux est la rémanence des effets du dispositif sur le comportement de l'usager. Tout laisse penser qu'un travail en profondeur par des équipes de recherche en sciences humaines et sociales pourrait apporter beaucoup tant d'un point de vue fondamental que pour identifier les leviers susceptibles d'allonger cette rémanence.

Les conditions de déploiement des dispositifs
La dimension industrielle liée à la fabrication en série du dispositif est un paramètre clé pour l'acceptabilité économique. La fabrication du dispositif en série dans le cadre de commandes groupées ou de marchés cadre permet d'augmenter significativement la rentabilité économique des dispositifs.

Sur la base de ces différentes analyses, en vue de la valorisation des résultats du programme SARI, on peut formuler les principales recommandations suivantes :
- approfondir la question relative à la rémanence de l'impact des dispositifs sur le comportement des usagers ;
- mener une réflexion autour des choix politiques en termes de stratégie de commandes groupées des dispositifs

Ces deux points clés feront que les solutions techniques développées dans le cadre du projet SARI sont acceptables d'un point de vue économique et déployables à grande échelle.

Références

- Aron M. (2009), Etudes d'enjeux, évaluation économique et perspectives de déploiement d'un système d'alerte en conditions atmosphériques dégradées, IRCAD, livrable 4.2.
- Briand P . (2008), Rapport d'analyse des comportements (en termes de trajectoires) observés sur le site expérimental en ligne droite sur une période de 2 mois, VIZIR, livrable 3.3.3.
- Deregnaucourt J., Drouot L. (2009), Rapport d'analyse économique des données recueillies - Synthèse et recommandations, AJISE, livrable 2.12.6.
- Guye O. (2009), Rapport d'expérimentation sur site du système d'information de l'usager sur la présence d'autres usagers, VIZIR, livrable 3.2.2.
- Institute for road safety research (SWOV) of Netherlands (2006), "Driving speed and the risk of road crashes: a review", Accident analysis and prevention, 38, 215-224
- Jégou S. (2009), Coûts liés au déploiement de la solution envisagée sur un carrefour plan en croix en zone rurale, VIZIR, livrable 4.1.2.
- Lebègue D. (2005), Révision du taux d'actualisation des investissements publics, Rapport du groupe d'experts, Commissariat Général du Plan

- Maurice J., Crozet Y. (2007), Le calcul économique dans le processus de choix collectif des investissements de transport.
- Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer (2004, 2005), Instruction cadre relative aux méthodes d'évaluation économique des grands projets d'infrastructures de transport.
- Ministère de l'Équipement, du Logement, des Transports et du Tourisme (1997), Conseil Général des Ponts et Chaussées, Ministère de l'Économie et des Finances, direction de la Prévision, « Transports urbains et calcul économique », document de travail n°97-1.
- Nilsson G. (1982), The effects of speed limits on traffic crashes in Sweden.
- Nilsson G. (2004), Traffic Safety dimensions and the power model to describe the effect of speed on safety, thesis, Lund Institute of technology, bulletin 221.
- ONISR, Données départementales d'accidentologie
- ONISR (mars 2006), Evaluation de l'impact du contrôle sanction automatisé sur la sécurité routière
- ONISR (2007), « La sécurité routière en France, Bilan de l'année 2007 »
- ONISR (2008), « La sécurité routière en France, Bilan de l'année 2008 »
- Peaucelle J.L. (2000), Les économies d'échelle dans les parties d'un processus productif et leur combinaison, IAE Paris
- Taylor M.C. et al (2000), The effect of drivers'speed on the frequency of road accidents, Transport Research Laboratory (TRL), report n° 421
- Violette E. (2009), Effet du système d'information sur le comportement des conducteurs, IRCAD, livrable 4.1.
- Violette E. (2008), Evaluation de l'impact du système d'information sur les trajectoires pratiquées par les usagées, RADARR, livrable 4.1.1.
- Yahiaoui G. (2009), Rapport d'expérimentations avant/après en virage concernant les améliorations par signalisation adaptée, VIZIR, 3.4.1.

INTERACCEPTABILITE DANS SARI

.Docteur en informatique en 1996. Maître de Conférences à l'Université de Valenciennes depuis 1996. Chercheur en Recherche Opérationnelle et Aide à la Décision, au Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines.

Ingénieur de recherche à l'université de Valenciennes depuis 1999, docteur en 1998 sur la coopération Homme-Machine. Recherche sur la modélisation de l'opérateur humain et sur la conception de systèmes coopératifs notamment en conduite automobile. Recherches sous-jacentes sur les aspects méthodologiques.

Igor CREVITS **Marie-Pierre PACAUX-LEMOINE**
Laboratoire d'Automatique, d'Informatique et de Mécanique Industrielles et Humaines
Valenciennes, France

Résumé
Ce papier aborde SARI selon le point de vue de l'aide à la décision. Décider est une tâche complexe et difficile. La structuration du problème est une étape clé de la décision. Elle nécessite une étude de la prise de décision, étape préalable à la constitution de modèles formels constituant l'aide. La grande variété des points de vue intervenant dans les décisions introduites par SARI conduit à étudier le problème sous l'angle multicritère, tirant ainsi avantages des champs de questions de la discipline. Les travaux se focalisent sur l'agrégation des critères de jugement juridique, individuel, social et économique.

Mots-clés: aide à la décision, analyse multicritère, agrégation multicritère.

Abstract
This paper tackles SARI in the way of decision aiding. Deciding is a complex and difficult task. Structuring the problem is a key step of decision-making. Studying the decision process is required as preliminary step to models building. The large variety of point of view intervening in decisions introduced by SARI brings to study the problem in a multicriteria way using results of this field. The works are focused on aggregation of juridical, cognitive, social and economical criteria.

Keywords: Decision aiding, Multiple Criteria Decision Analysis, multicriteria aggregation.

1. Introduction

Ce papier présente la réflexion conduite au sein d'AJISE (Acceptabilité Juridique, Individuelle, Sociale et Economique) sur l'interacceptibilité dans le contexte de SARI. L'angle de l'aide à la décision est choisi comme cadre de réflexion. Bien que récent (l'origine remonte à la seconde guerre mondiale), ce domaine aborde des champs de questions d'une grande largueur entre la théorie de la décision et la psychologie cognitive (voir Tsoukias (2008) pour un exposé historique de l'aide à la décision). Parallèlement à des développements théoriques, l'aide à la décision s'est également orientée vers des réflexions méthodologiques pour améliorer ses aptitudes à identifier les problèmes. Une synthèse est disponible dans Bouyssou et al. (2006). Par ailleurs, l'aide à la décision s'est dotée d'une orientation multicritère, avec les travaux de Roy (1985), permettant d'aborder des problèmes d'une grande largueur. L'aide à la décision aborde également les problèmes d'une façon profonde. Elle est à même de se confronter à des problèmes concrets de grande envergure (voir par exemple Bena e Costa (2002) et Mistri (2007)) et de produire des modèles formels apportant des réponses aux problèmes de décision. On trouve dans Belton et Stewart (2002) et Figuera et al. (2007), deux états de l'art en matière de modélisation.

AJISE se trouve au confluent de plusieurs champs d'hypothèses favorisant une investigation sous l'angle de l'aide multicritère à la décision. L'étude s'est attachée à structurer le caractère multicritère du problème. Elle s'est inspirée des réflexions en ce domaine. Cependant, face à l'étendue du problème, aucun cadre méthodologique n'est complètement satisfaisant et directement applicable. Dans ce problème multicritère, l'étude s'est attachée à identifier, proposer et structurer des processus décisionnels émergeant de la cohabitation des acceptabilités, en vue de produire des procédures d'agrégation, préparant ainsi une modélisation formelle.

La section 2 présente les différentes hypothèses de l'étude. La section 3 aborde l'étude multicritère de l'interacceptabilité. Après une description du cadre méthodologique, nous présentons la structuration des acceptabilités prises individuellement, puis les trois modèles d'interacceptabilité. Enfin, la section 4 conclue sur les enseignements tirés de cette étude abstraite sur l'interacceptabilité. Nous montrons également en quoi les résultats du travail conduit dans AJISE permettent d'envisager l'interacceptabilité par les décisions techniques.

2. Hypothèses relatives à AJISE

2.1 Hypothèses provenant de SARI

SARI fédère plusieurs réflexions autour de ses enjeux. Le premier pan de réflexions concerne un aspect technique visant à la création de systèmes de surveillance et d'alerte au conducteur. De fait, SARI amène à poser des hypothèses quant aux situations méritant surveillance et alerte. Pour un cadre d'hypothèses cohérent et correctement formulé, plusieurs solutions techniques peuvent être envisagées. Dès lors, la question qui se pose naturellement vise à identifier le système le plus efficace.

Cependant, cette question élude la question plus profonde de l'affinement des objectifs initiaux de surveillance et de la façon d'y apporter une réponse. SARI ne s'est pas placé dans une situation concurrentielle en étudiant trois réponses indépendantes abordant chacune un problème différent nécessitant une surveillance : dégradation brutale de l'adhérence, risque de perte de contrôle du véhicule et mauvaise visibilité.

En complément de ces réflexions techniques, SARI comprend un thème transversal dont les objectifs sont d'étudier les facteurs selon lesquels les solutions techniques peuvent être jugées. Ce thème transversal a pris le nom d'AJISE. Au delà de cette seule réflexion, l'objectif d'AJISE est également de compléter les travaux des thèmes techniques dans la définition et la conduite de leurs phases expérimentales, en produisant ses outils de mesures.

Avec AJISE, SARI s'est donc doté d'un outil améliorant la valeur du jugement porté sur les solutions techniques. Cependant, par sa façon de procéder, SARI va plus loin. En rassemblant les quatre acceptabilités en un seul thème, dès le début du projet, SARI stimule une réflexion abstraite sur une mise à plat de l'ensemble des acceptabilités permettant l'identification de relations entre elles. Par ailleurs, par le point de vue expérimental, un complément vers la définition d'outils opérationnels satisfaisant l'ensemble des acceptabilités est envisageable.

2.2 Hypothèses relatives aux objectifs d'AJISE

Les solutions techniques peuvent être jugées selon différents points de vue. AJISE s'est fixé comme objectifs de départ d'aborder les quatre points de vue suivants :

- juridique : il étudie la façon dont les solutions s'intègrent dans le code de la route, l'assurance et la législation,
- individuel : il vise à identifier les facteurs par lesquels un message issu de l'infrastructure est perçu et utilisé par l'usager,
- social : il s'intéresse aux effets de l'information délivrée par le dispositif sur le comportement de l'usager dans son environnement psychosociologique,
- économique : il se penche sur les aspects économiques associés au déploiement d'une solution technique.

Habituellement, la conduite de projets relatifs à une solution technique d'une ampleur publique amène à envisager une articulation chronologique des points de vue. Les points de vue individuel et social relèvent d'une problématique de conception et sont donc abordés dans les réflexions techniques. Les points de vue juridique et économique sont abordés dans les décisions de déploiement par les gestionnaires publics.

Il est possible d'envisager d'autres articulations de ces points de vues. Chaque point de vue, considéré indépendamment des autres, peut être estimé de deux manières : acceptable ou inacceptable. S'appuyer sur la mise en commun des acceptabilités opérée par AJISE permet de favoriser la réflexion relative à la notion d'acceptabilité. Cette question, nommée interacceptabilité, a été abordée dans AJISE. Nous partons de l'hypothèse que ce qui est acceptable selon un point de vue ne l'est pas selon un autre. Dès lors, il convient d'introduire la notion plus souple de satisfaction. L'interacceptabilité aborde donc le problème de la construction d'une nouvelle articulation des acceptabilités. Pour autant, l'esprit de cette étude n'est pas exclusivement de produire un résultat concurrent à la pratique habituellement chronologique. En adoptant cette posture, l'interacceptabilité offre l'opportunité d'apporter une argumentation à cette pratique, en particulier en détaillant les relations entre les acceptabilités. En effet, il est possible que les conclusions de l'étude puissent montrer le bien fondé de cette façon de faire. Cette éventualité n'est pas exclue. De même, l'étude peut montrer que les acceptabilités ne sont pas différenciées et produisent les mêmes conclusions, constituant ainsi une démonstration.

AJISE présente également une étendue disciplinaire importante. L'interacceptabilité nécessite des investigations, et donc une connaissance, de quatre domaines de réflexions. Ces domaines présentent de grandes différences dans les problèmes gérés, mais également dans la façon d'y

apporter une réponse. Une vision globale est donc nécessaire à la conduite de l'étude. Cette vision ne peut reposer que sur la seule équipe d'étude de l'interacceptabilité. Par ailleurs, une telle étude ne porte ses fruits que si les participants élargissent leur point de vue.
De fait, il résulte une dernière caractéristique qui doit apparaître dans l'étude de l'interacceptabilité. Pour pouvoir produire un résultat, il est nécessaire de se pencher sur la façon de conduire l'étude. A tout moment, la question de la démarche à adopter pour l'investigation doit être présente.

La cohabitation des acceptabilités conduit à se pencher sur leur harmonisation. Le système de valeur d'une acceptabilité peut ainsi s'affiner, s'étendre ou se compléter sous l'éclairage des autres. Cette harmonisation présente également l'avantage de nécessiter l'explicitation d'une connaissance profonde de chacune des acceptabilités. Ainsi, plusieurs relations pourront être établies de façon argumentée entre les systèmes de valeurs de chacune des acceptabilités. Ces relations constituent une étape importante dans la construction d'un nouveau système de valeurs global.

2.3 Aide à la décision

Ainsi que nous l'avons évoqué, AJISE revêt également un angle décisionnel dans la pratique de gestion de projet d'une telle ampleur. Dès lors, les réflexions sur l'interacceptabilité permettent d'envisager d'introduire des facteurs individuels et sociaux dans les décisions de déploiement. Il s'agit donc de définir les modalités de prise en compte de l'ensemble des points de vue au moment du choix. Cet angle décisionnel s'adosse nécessairement aux réflexions de l'orientation abstraite. Il s'agit ici d'introduire des hypothèses sur le décideur.

Les questions posées par AJISE relèvent de deux catégories distinctes. Le premier champ concerne un complément expérimental aux thèmes techniques, le second une réflexion sur des motivations décisionnelles. Le premier relève donc d'une problématique opérationnelle et le second abstraite. Bien que des liens existent entre les deux champs de questions, leurs réflexions sont différentes. Les participants à l'étude ont donc deux champs de questions à aborder.

De par sa nature, l'interacceptabilité est abordée comme un problème d'aide multicritère à la décision. Notons que, pour autant, le point de vue monocritère n’est pas rejeté a priori. Il est possible que les conclusions de l’étude sur l’interacceptabilité mettent en évidence la prédominance d’un point de vue, en constituant ainsi une argumentation. Le cadre de référence utilisé tout au long des travaux est la Méthodologie Multicritère d'Aide à la Décision (MMCAD).

2.4 Hypothèses relatives à la conduite de l'étude sur l'interacceptabilité

Comme les plannings de conduite des projets des thèmes techniques n'étaient pas synchronisés, les travaux d'AJISE sur l'interacceptabilité se sont orientés vers une réflexion abstraite car les éléments nécessaires à un travail technique n'étaient pas disponibles. Dès lors, les réflexions se sont focalisées sur l'aspect décisionnel d'AJISE, domaine dans lequel la communauté scientifique a produit de nombreux résultats.

Au démarrage de l'étude, les thèmes techniques ne présentaient pas le même niveau de finalisation dans la description des solutions qu'ils envisageaient. Il est alors apparu préjudiciable à l'étude de se baser sur les solutions des thèmes techniques pour guider les investigations.

Les réflexions se sont donc appuyées sur une seule solution fictive définie par rapport aux objectifs de SARI. De fait, l'étude s'est placée dans une orientation de description des effets par lesquels une solution peut se manifester dans l'éventualité qu'elle soit mise en oeuvre. Notons cependant que cette orientation n'est pas liée à ce seul état de fait. L'indisponibilité d'une information suffisamment détaillée de chaque solution technique n'altère en rien la conduite de l'étude. En ne se plaçant pas en mode concurrentiel dans le jugement des thèmes techniques, SARI a orienté les réflexions sur l'interacceptabilité vers une problématique de description.

L'interacceptabilité présente des caractéristiques qu'il convient de maîtriser pour conduire son étude. Les grands projets relatifs à la sécurité routière n'ont jamais été abordés sous cet angle. Par contre, ils ont mis en évidence l'intérêt d'une telle investigation.

L'étude n'a pas fait le choix d'un examen exhaustif de la conduite de grands projets publics (ou privés) pour identifier lesquels pouvaient correspondre à la problématique de l'interacceptabilité, à tout le moins s'en approcher. Un tel examen ne garantissait pas un résultat satisfaisant. Par ailleurs, il est probable que le temps nécessaire à une telle investigation soit plus long que de considérer l'interacceptabilité comme un problème nouveau. Cependant, cet aspect n'est pas exclu. L'étude conduite permet de cerner les questions essentielles ce qui fournit la base d'une meilleure analyse de l'existant.

La réflexion sur l'interacceptabilité a débuté dès le démarrage d'AJISE. Ce travail a fait l'objet de la thèse de doctorat de Duquesne (2009) dont seules les grandes lignes sont présentées ici.

3. Réflexion abstraite sur l'interacceptabilité

3.1 Angle de l'aide multicritère à la décision

MMCAD pose des champs de questions guidant la conception d'une aide destinée à un décideur confronté à un problème où plusieurs points de vues sont à prendre en compte. Le concept fondamental de l'aide à la décision est la notion de préférence. L'aide constitue le résultat d'un processus de modélisation des préférences du décideur. La forme que prend ce modèle s'appuie sur une formulation mathématique qui peut être le cœur d'un produit logiciel. La décision est vue comme la restriction d'un ensemble de possibilités à celles qui satisfont au mieux le système de valeurs du décideur. Les préférences constituent le résultat, appelé modèle, d'une explicitation abstraite, souvent formalisée, appelée modélisation, du système de valeurs du décideur. Le modèle de préférences est représenté par un ensemble de relations qui permet de départager les possibilités. La modélisation des préférences nécessite donc de préciser les facteurs par lesquels les possibilités sont mises en relation. Ces facteurs sont représentés par la notion de critère et les possibilités par la notion d'action potentielle.

MMCAD aborde la structuration des décisions en quatre niveaux, autour des notions d'actions potentielles, de critères et de préférences. Le niveau 1, intitulé "Objet de la décision et esprit de la recommandation", porte son attention sur les propriétés et la structuration des possibilités en un ensemble d'actions potentielles exploitables par l'aide. Le niveau 1 aborde également la façon dont la restriction de l'ensemble des actions potentielles peut s'opérer pour produire la décision. La décision est ici vue par quatre problématiques de référence : choix, tri, rangement et description. Le niveau 2, intitulé "Analyse des conséquences et élaboration de critères", porte sur la construction des critères. Les critères sont l'aboutissement d'un processus de raffinement des facteurs intervenant dans la décision pour produire une synthèse exploitable par l'aide. Ce processus débute par l'identification des impacts perçus des actions

potentielles dans l'éventualité qu'elles soient mises en oeuvre. Ces impacts sont appelés conséquences et sont qualifiées d'élémentaires lorsqu'ils sont reconnus par tous les intervenants de la décision. Les conséquences élémentaires sont complétées par une échelle de valeurs pour donner les dimensions. Ces dimensions sont harmonisées pour fournir un ensemble de critères numériques suffisants pour différencier les actions potentielles et être exploités par l'aide. Le niveau 3, intitulé "Modélisation des préférences globales et approche opérationnelle pour l'agrégation des performances", aborde la construction des relations qu'il est envisageable d'établir entre les actions potentielles, représentées par l'ensemble des critères. Enfin, le niveau 4, intitulé "Procédures d'investigation et élaboration de la recommandation", concerne la mise en œuvre du modèle conçu dans les trois étapes décrites précédemment. Cette mise en oeuvre peut conduire à la conception d'un produit logiciel ou à l'utilisation de produits existants. Les modalités de communication du résultat de l'aide au décideur sont également abordées à ce niveau. Par ailleurs, la conformité du résultat de l'aide au problème est examinée. Cette analyse permet de déterminer si les hypothèses inhérentes à la modélisation sont satisfaisantes. Enfin, la tolérance du résultat aux éventuelles variations auxquelles la décision peut être confrontée au moment de sa mise en oeuvre est abordée.

3.2 Structuration des acceptabilités

La construction des critères et des préférences a suivi le même principe pour l'ensemble des acceptabilités. Chaque expert, représentant une acceptabilité, était invité à décrire les facteurs sur lesquels il porte son attention dans l'examen d'un projet représenté par l'action potentielle. Du point de vue d'un expert, il s'agit donc des effets qui entrent dans ses considérations lors du jugement de l'action. Il s'agit donc des conséquences élémentaires restreintes à l'acceptabilité.

Ce travail s'est organisé autour de séries d'entretiens avec relance et processus de revue. Les résultats de cette partie de l'étude montrent plusieurs différences entre les acceptabilités. La diversité de la nature des facteurs est attendue. Le niveau de décomposition des facteurs est beaucoup plus important pour les acceptabilités individuelle et sociale. Un travail de synthèse a permis d'identifier les critères considérés. Pour les acceptabilités économique et juridique, l'expression de critères est plus rapide. Par ailleurs, les articulations des différents facteurs propres à chaque acceptabilité présentent de grandes disparités.

L'acceptabilité juridique est construite par l'intermédiaire de cas d'études accidentogènes, élaborés à partir de situations avérés dans des contextes similaires. Quatre questions sont abordées en six cas : défaillance matérielle, mise en cause du conducteur, conséquence en cas d'information erronée et causes en cascade. Il s'agit de mettre en évidence les décisions que serait amené à prendre un juge quant à l'application de la législation ou de son évolution par la jurisprudence. Quatre conséquences élémentaires sont identifiées par ces cas : la convenance du message qui relève les contradictions et ambiguïtés induites par le dispositif, la fiabilité de l'analyse de la situation par le système, les dysfonctionnements du dispositif et l'homéostasie du risque.

L'acceptabilité individuelle se penche sur les facteurs cognitifs conduisant à une modification adaptée du comportement du conducteur. Les conséquences élémentaires représentent six conditions nécessaires pour que le message produit par le système soit acceptable : perception, compréhension et crédibilité du message, effort dans le choix de l'action à effectuer, puis dans la réalisation et bénéfice en terme d'expérience. Les cinq premiers facteurs peuvent conduire à des recommandations ergonomiques, mais le dernier est de nature prospective.

L'acceptabilité sociale manipule les facteurs amenant un conducteur à respecter un comportement prescrit. Les conséquences élémentaires considérées par l'acceptabilité sociale sont au nombre de sept : les croyances relatives au comportement, l'évaluation des conséquences, les croyances normatives, les attitudes envers le comportement, les motivations à se soumettre les normes subjectives et l'intention comportementale.

L'acceptabilité économique mesure les flux financiers nécessaires au déploiement du système. Deux types de flux permettent de représenter l'impact d'une solution technique et constituent donc quatre conséquences élémentaires : les flux directs regroupent les coûts d'investissement, de maintenance et d'exploitation et les coûts de financement et les flux indirects propres à l'accidentalité. Dans le raisonnement de l'acceptabilité économique, la situation sans déploiement est une action potentielle de référence. De fait, le raisonnement est prospectif et basé sur des comparaisons. Il constitue donc une situation habituelle d'aide à la décision.

La capitalisation des résultats relatifs aux critères manipulés propres à chacune des acceptabilités permet d'orienter les réflexions vers l'interacceptabilité sans qu'il soit nécessaire de construire les préférences propres à chacune des acceptabilités. Notons d'ailleurs que ces entretiens ont mis en évidence la nécessité pour les experts de se pencher sur leurs préférences habituellement usitées.

3.3 Modèles d'interacceptabilité

La construction du modèle d'interacceptabilité s'est opérée de deux façons. Dans les deux cas, les experts de chacune des acceptabilités ont participé à la construction du modèle.

Dans un premier temps, les experts ont identifié des relations qu'ils pouvaient établir de façon argumentée entre les acceptabilités. Notons ici que les relations s'établissent souvent dans le détail et non sur des aspects globaux. Il est alors nécessaire de se pencher sur les conséquences élémentaires et non sur les critères. Il s'agit en fait de reconsidérer les conséquences puisque leur intelligibilité doit être identique pour toutes les acceptabilités. Le grand nombre de relations qu'il est possible d'argumenter nécessite d'introduire des hypothèses supplémentaires afin d'éviter de produire un résultat qui ne soit que spéculatif. Le cadre de l'accidentalité, reconnu commun par toutes les acceptabilités, sert donc de cadre fédérateur à la constitution du modèle. Deux modèles ont été conçus dans ce cadre.

Le premier modèle aborde l'accidentalité comme point central. Dans cette position, l'accidentalité représente un objectif de conception : concevoir un système réduisant l'accidentalité. Et, sous l'hypothèse qu'il soit déployé, il relie la conception et l'utilisation du système : estimer les conséquences en cas d'inaptitude du système à produire un effet. Ce modèle correspond donc à la pratique des décisions chronologiques habituellement opérées, à cette particularité près qu'il émane des experts des acceptatibilités et non des domaines techniques. Il présente donc l'intérêt de préciser les liens entre les quatre points de vue dans le cadre de cette pratique. En amont de l'accidentalité, les points de vue individuel et social sont en forte relation autour de l'action. Ils constituent un point de vue prescriptif de conception en vue d'augmenter l'éventualité du passage de la perception et de l'intention au comportement effectif. Une partie du point de vue économique intervient également en amont dans une orientation classique de décision d'investissements (coûts d'achat, de financement et de fonctionnement). En aval, le point de vue juridique intervient dans la recherche de responsabilités lorsque l'accident s'est produit. Le point de vue économique intervient alors en terme de maintenance dans le cas où le système est mis en cause ou insuffisant.

Le deuxième modèle d'interacceptabilité aborde l'accidentalité dans le seul cadre des décisions en recherche de responsabilités et financement des conséquences en terme de maintenance. L'identification des responsabilités relève de l'acceptabilité juridique. Elle est donc mise en relation avec les autres acceptabilités. Le lien avec l'acceptabilité sociale intervient en cas de convenance insuffisante du message avec les croyances, les motivations et l'évaluation des conséquences. Le lien avec l'acceptabilité individuelle intervient également en cas de convenance insuffisante du message en terme de perception. Le lien avec l'acceptabilité économique s'opère en cas d'opérations de maintenance corrective ou évolutive.

Cependant, ces deux premiers modèles présentent plusieurs défauts selon les experts. Il réside une séparation trop importante entre les acceptabilités individuelles et sociales. Le niveau de détail est élevé, en particulier en ce qui concerne les aspects humains. La prépondérance de ces aspects est par ailleurs soulignée. La cohérence globale des relations mérite d'être approfondie car les significations des relations propres à chacune des acceptabilités montrent des différences et les nouvelles relations établies entre les acceptabilités présentent pour les experts un caractère de nouveauté qu'il convient d'expliciter. Le troisième modèle aborde donc l'interacceptabilité sous l'angle du choix. Cette orientation se trouve face à une autre difficulté. Aucun décideur susceptible de se poser la question du déploiement de solutions SARI n'est intégré à AJISE. Notons par ailleurs que, vue la nouveauté des objectifs de SARI, il n'est pas déraisonnable de considérer qu'un décideur suffisamment éclairé n'existe pas. Dès lors, il n'existe pas de système de valeurs qui pourrait faire l'objet d'une modélisation des préférences. Les préférences sont donc à construire *ex nihilo*, à tout le moins en s'appuyant sur des éléments qui ne sont pas directement liés à la décision.

Le troisième modèle proposé s'appuie sur les éléments des précédents modèles d'interacceptabilité qui sont revus sous l'angle de la prise de décision dans son acception habituelle du choix. Les experts ont imaginé en quoi leurs réflexions pourraient aider un décideur, en s'appuyant sur leur connaissance du contexte de SARI et sur les réflexions qui ont conduit au premier modèle. Pour respecter un principe de neutralité, chaque expert a exprimé la contribution qu'il envisage de chaque acceptabilité à une décision finale en excluant toute référence à l'acceptabilité qu'il représente. Le modèle produit se base sur une vision globale de l'expertise regroupant sémantiquement l'ensemble des conséquences élémentaires de toutes les acceptabilités en six critères. Au sein de chaque critère, les conséquences élémentaires sont utilisées pour l'évaluation en étant associées à des barèmes de notation. Les dimensions ainsi conçues sont agrégées par une moyenne pondérée. Pour poursuivre les investigations et améliorer le modèle, il est nécessaire d'intégrer dans les réflexions un décideur. Bien évidemment, ainsi que nous l'avons évoqué, le décideur de ce problème n'existe pas. Cependant, de nombreuses décisions sont prises sur des questions similaires. Des informations sur les systèmes de valeurs sous-jacents permettraient de toute évidence une avancée significative.

4. Perspective : éclairage de l'interacceptabilité par le point de vue technique

L'étendue du sujet de l'interacceptabilité dans AJISE s'avère recéler de nombreuses pistes intrinsèques de structuration. Les problématiques propres à chacune des acceptabilités ont pu être prises en considération par les autres acceptabilités. Les réflexions, spécifiques puis collectives, ont conduit à la construction de deux modèles qui établissent des liens élémentaires et globaux entre les acceptabilités. Ces modèles constituent une ébauche, mais l'étude montre qu'une synergie naît de la cohabitation des quatre acceptabilités présentes dans AJISE. La source d'un modèle d'interacceptabilité réside dans cette synergie. De fait, le

caractère multicritère est confirmé. Il est donc pertinent d'aborder l'interacceptabilité sous cet angle. MMCAD s'est montré d'une grande utilité. Même si de nombreux aspects de cette méthodologie n'ont pas été abordés dans l'étude, les notions relatives à l'élaboration de critères ont permis de faire face à la grande diversité des points de vue manipulés au sein d'AJISE. La construction graduelle des critères sur la base des conséquences, puis des dimensions, a permis de construire de nouveaux critères en recombinant les conséquences et en revenant sur leur caractère élémentaire. Notons que, en raison de l'absence d'hypothèses suffisamment précises sur un système de valeur représentant un décideur, la modélisation des préférences ne peut produire de conclusions pertinentes. De fait, l'étude permet d'envisager la façon de recourir à MMCAD en présence de plusieurs disciplines structurées. La question de la validation n'a pas été posée dans l'étude, car les réflexions se sont focalisées sur la conception du modèle d'interacceptabilité. Notons d'ailleurs qu'une thèse ne suffit pas à ce seul aspect. La validation du modèle est une question importante en aide à la décision, abordée dans le niveau 4 de MMCAD. Cependant, une étude d'une telle ampleur montre la nécessité d'envisager de nouvelles pistes de validation. Ainsi, il est d'ores et déjà possible de voir dans la synergie qui s'est créée au sein d'AJISE, une piste de validité. Cet aspect mériterait d'être étudié.

De par l'orientation abstraite prise par l'étude, le point de vue technique n'a pas été abordé. Les seuls liens avec les thèmes techniques ont concerné la valuation de certains critères. Cependant, à l'issue de SARI, il est possible de compléter l'étude à la lumière du complément expérimental fourni par AJISE aux thèmes techniques. De même, le point de vue des gestionnaires n'a pas fait l'objet d'investigations. Cependant, la problématique décisionnelle sous-jacente, fortement économique, est bien cernée. Le point de vue technique apparaît plus riche en terme d'interacceptabilité.

Le point de vue technique peut intervenir de deux façons dans l'étude de l'interacceptabilité. A l'issue du projet, les thèmes techniques disposent de solutions définies avec précision. Dès lors, les actions potentielles sont clairement identifiées. Par ailleurs, les thèmes techniques ont été confrontés, lors de la conception de leurs systèmes, à des questions relevant des quatre acceptabilités : coût (économique), fiabilité et modes dégradés (juridique), ergonomie (individuel) et cohérence avec le code de la route (social). Ils disposent donc d'une vision fine et complète des acceptabilités en ce qui concerne leur projet. Cette vision est favorable à la valuation des critères des modèles proposés.

Mais, au-delà de ce complément à l'étude réalisée, le point de vue technique présente un intérêt en terme de modélisation des préférences. Les thèmes techniques se trouvent en situation de décision dans la conduite de leur projet. Ils se donnent comme objectif de concevoir un système qui satisfait à tous les points de vue, en particulier ceux considérés dans AJISE, ce qui définit une situation de surclassement. Cependant, cette situation est idéale car elle postule qu'il n'existe pas de système où une insatisfaction restreinte à un seul point de vue puisse se présenter. L'objectif devient alors de définir une solution satisfaisant partiellement, mais de façon suffisante, à un sous-ensemble de points de vue significatifs. Ainsi, sans en avoir une vision précise et exhaustive, les thèmes techniques procèdent à des arbitrages qu'ils peuvent argumenter. Dans la mesure où l'économie, le droit, le code de la route et l'ergonomie ne fournissent pas globalement de réponse à leurs interrogations, ils construisent ces arbitrages eux-mêmes. Les économistes, les juristes et les ergonomes ne sont pas en cause, ils ne peuvent être informés de toutes les questions techniques que se pose chaque ingénieur, leurs réflexions sont plus larges. De même, les ingénieurs ne peuvent être mis en cause, il leur faudrait être spécialiste de l'économie, du droit, de la psychologie et de la sociologie. Le rendez-vous se fait à un autre moment et par d'autres intermédiaires que la conception. Il

réside dans ces arbitrages techniques une piste de définition de nouvelles modalités d'agrégation des quatre points de vue abordés par AJISE.

5. Conclusion

Le cadre de l'aide multicritère à la décision a montré tout son intérêt. Il a permis de structurer les réflexions sur l'interacceptabilité en identifiant les relations entre les acceptabilités. Ce premier travail met en évidence qu'une maturité est nécessaire pour aboutir à un résultat représentatif. La conduite de cette première étude contribue à construire cette maturité. Il s'agit du résultat le plus important de l'étude de l'interacceptabilité : avoir réussi à créer les conditions favorables à la production de son résultat. Il en va de même pour AJISE et pour SARI. L'ampleur des questions initialement posées est maintenant bien identifiée. La maîtrise nécessaire à la conduite des études est désormais acquise. A l'issue de ce travail, les perspectives s'avèrent prometteuses.

Références

- Belton, V., Stewart, T. J. (2002), "Multiple Criteria Decision Analysis. An Integrated Approach", Kluwer Academic Publishers.
- Bena e Costa, C. A., da Costa-Lobo, M. L., Ramos, I. A., Vansnick, JC. (2002), "Multicriteria Approach for Strateic Town Planning", in Aiding Decisions with Multiple Multiple Criteria. Essays in Honor of Bernard Roy, Kluwer Academic Publishers.
- Bouyssou, D., Marchant, T., Pirlot, M., Tsoukias, A., Vincke, P. (2006), "Evaluation and Decision Models with Multiple Criteria. Stepping Stones for the Analyst", Springer.
- Duquesne, L. (2009), « Une approche d'aide multicritère à la décision pour l'acceptation d'une signalisation routière dynamique », Université de Valenciennes.
- Figueira, J., Greco, S., Erghott, M. (2005), "Multiple Criteria Decision Analysis. State of Art Surveys", Springer.
- Mistri., M (2007), "Multi-Objective Preferences and Conflicting Objectives: The Case of European Monetary Integration", in Advances in Multiple Critéria Deision Making and Human Systems Managemenent: Knowledge and Widsom, IOS Press, 3-16.
- Roy, B. (1985), « Méthodologie multicritère d'aide à la décision », Economica.
- Tsoukias, A. (2008), "From decision theory to decision aiding methodology", European Journal of Operational Research, 187, 138-161.

APPROCHE METHODOLOGIQUE POUR L'ETUDE DE LA COMPLEMENTARITE DES DISPOSITIFS ET DEMARCHES EXPERIMENTALES DANS SARI

Docteur en automatique en 1998. Ingénieur de recherche à l'université de Valenciennes depuis 1999. Recherche sur la modélisation de l'opérateur humain et sur la conception de systèmes coopératifs notamment en conduite automobile. Recherches sous-jacentes sur les aspects méthodologiques.

Docteur en informatique en 1996. Maître de Conférences à l'Université de Valenciennes depuis 1996. Chercheur en Recherche Opérationnelle et Aide à la Décision, au Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines.

Marie-Pierre PACAUX-LEMOINE **Igor CREVITS**
Université Lille Nord de France, UVHC, LAMIH, FRE 3304 CNRS
Valenciennes, France

Résumé
Le choix d'une méthode de travail est une étape indispensable au bon déroulement d'un projet. Cette étape, qui permet d'atteindre des objectifs d'optimisation, de cohérence, de traçabilité et de capitalisation, est d'autant plus importante que le projet est de grande envergure tel que celui étudié, le projet PREDIT SARI. Il a pour objectif l'évaluation de plusieurs types de signalisation dynamique qui répondraient au risque associé à la conduite sur trois ruptures identifiées en fonction de l'infrastructure. L'objectif de la communication est, dans un premier temps, de proposer une méthode qui facilite la lecture des travaux issus de ce projet. Dans un second temps, la méthode est évaluée en fonction des résultats qu'elle a permis de mettre en évidence ; une critique est ensuite proposée pour une meilleure adaptation au projet étudié, mais aussi à différents types de projet.

Mots-clés: Méthode, sécurité routière, protocole expérimental, analyse de données

Abstract
The choice of a method is a first and necessary stage to make a project successful. This stage allows reaching targets such as optimization, coherence, traceability and capitalization. It is all the more important that the project is large-scale like the studied project called SARI. Its objective is the valuation of several types of new dynamic signs proposed in order to aid drivers to detect and react to three types of road infrastructure risk. The goal of this paper is firstly to propose a method to facilitate the reading of project results. Secondly, the method is valuated according to the underlined results. A critique is proposed and discussed in order to be able to have some information concerning what would be a good method.

Keywords: Method, road safety, experimental protocol, data analysis

1. Introduction

L'objectif de cette communication est de souligner l'importance d'une prise en compte précoce et conjointe des facteurs humains et des sciences de l'ingénieur dans la conception des systèmes dédiés à l'homme. Plusieurs méthodes intégrant des critères ergonomiques et des notions d'utilisabilité ont ainsi été proposées, notamment par le génie logiciel. Nielsen (1993) définit l'utilisabilité comme une sous-partie de l'acceptabilité, qui correspond à la façon dont le produit répond aux attentes du client. Gould et Lewis (1985) décrivent l'ingénierie d'utilisabilité comme une approche générale impliquant trois stratégies : une prise en compte précoce des utilisateurs et de leurs tâches, des mesures empiriques et un design itératif. De nombreuses normes ont été élaborées pour définir les conditions de la mise en œuvre d'une telle approche (Brangier et Barcelina, 2003). Mais il existe également d'autres méthodes répondant à d'autres types d'approche (Brangier et al., 2003). Les auteurs démontrent l'intérêt de les faire coexister pour exploiter leur complémentarité. C'est cette recherche de complémentarité qui nous a amenés à utiliser une méthode issue de l'Automatique et plus précisément de son axe Système Homme-Machine. La méthode, appelée méthode en U a été proposée par Millot (Millot, 88). D'abord appliquée en télérobotique (Millot et Roussillon, 1991), puis en contrôle de trafic aérien (Millot et Debernard, 1993), elle a aussi été utilisée dans le domaine de la conduite automobile pour la conception et l'évaluation de système d'aide à la conduite (Tricot, 2005). Cette méthode met en exergue la nécessité de disposer d'un modèle de l'opérateur humain mais aussi de la définition des modes de coopération qu'entretient l'opérateur humain avec le système.

La méthode est ici appliquée au projet PREDIT SARI. Ce projet, dont l'appellation signifie Suivi Automatisé de la Route pour l'Information des conducteurs et gestionnaires, a plusieurs objectifs parmi lesquels celui de détecter les risques de perte de contrôle des conducteurs par l'identification d'un comportement inadapté ou d'un environnement de conduite dangereux. Un risque étant identifié, l'objectif est ensuite d'évaluer un dispositif d'alerte aux conducteurs placé en bord de voie. Plusieurs dispositifs ont été imaginés et testés en laboratoires puis sur routes réelles, conjointement par les sciences de l'ingénieur et les sciences humaine et sociale. Les systèmes développés tentent de diagnostiquer des situations de conduite dangereuses, en temps réel, et d'alerter l'usager par une signalisation dynamique (Gallenne et Fournier, 2007). Les risques étudiés sont au nombre de trois, il s'agit de la perte d'adhérence en cas de diagnostic de météorologie dégradée, de la perte de contrôle du véhicule en cas de virage dangereux, et de la perte de visibilité/lisibilité en intersection ou en sommet de côte. L'ensemble des dispositifs étudiés constitue des systèmes homme-machine, les conducteurs et les gestionnaires d'infrastructure représentant la partie humaine, les dispositifs de diagnostic et d'alerte représentant la partie machine. Le déploiement de la méthode a été facilité par la structure du projet organisée en thèmes : trois thèmes dits techniques pour répondre à chaque risque étudié et un thème transversal, appelé AJISE, dédié à l'étude de l'acceptabilité des dispositifs suivant quatre points de vue, la psychologie cognitive, la psychologie sociale, l'économie et le droit.

La communication s'articule autour de 3 parties. Une première partie s'attache à présenter la méthode en U et son intérêt pour le domaine étudié. Une deuxième partie présente son application au projet SARI sur quelques exemples. Une troisième partie propose une discussion autour des avantages et inconvénients de la méthode et des outils d'évaluation en général avant de conclure.

2. Présentation de la méthode en U et application à la conduite automobile

La méthode en U est une méthode de conception et d'évaluation de systèmes homme-machine. Les dispositifs développés dans le cadre de SARI sont des systèmes homme-machine puisqu'ils analysent le comportement du conducteur dans le cas de systèmes de diagnostic et qu'ils communiquent avec le conducteur dans le cas des systèmes d'alerte. L'interaction entre l'homme et la machine est apparente pour l'alerte aux conducteurs, mais elle est en partie cachée lorsqu'il s'agit de construire le diagnostic.

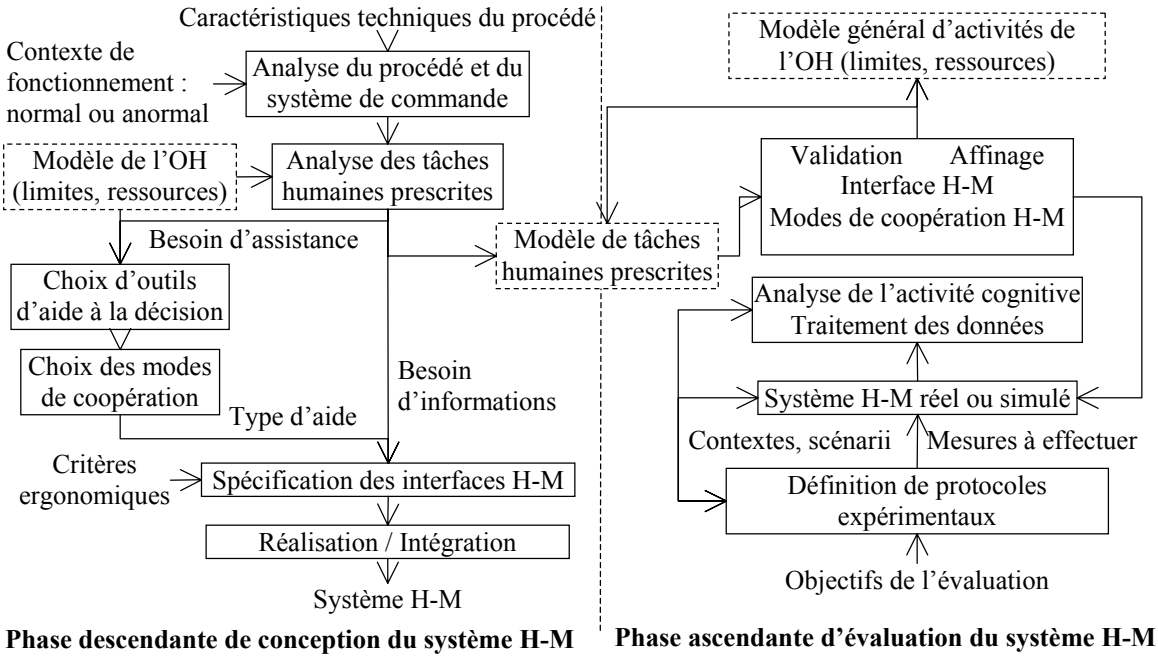


Figure 1 – Méthode en U (Millot, 88)

Les différentes étapes de cette méthode prennent en compte des critères liés au développement du système tels que la faisabilité, la fiabilité, la robustesse, mais aussi et surtout des critères liés à son exploitation par l'homme tels que l'ergonomie physique et cognitive. Alors que l'étape descendante de conception conduit à la modélisation et à l'implantation du système homme-machine, l'étape ascendante permet l'évaluation du système selon des critères de performance du procédé, mais aussi selon des critères spécifiquement humains. La première étape du projet consiste à définir les *caractéristiques techniques du procédé*. Dans notre cas, le procédé est la conduite automobile. C'est un procédé continu et dynamique. Il est constitué d'une infrastructure dont l'état peut évoluer et d'usagers adoptant des comportements aussi variés qu'incertains, et des véhicules de diverses capacités. *Le contexte de fonctionnement* de ce procédé est normal dès que le trafic est fluide et sécurisé, le fonctionnement anormal du procédé est celui ne permet pas sa régulation, tel un accident ou une saturation du trafic. La conception de système homme-machine implique une *analyse du procédé et de son système de commande*. Dans le cas de la conduite automobile, cette analyse passe par une bonne connaissance du réseau routier que l'on cherche à étudier et de ces usagers. Le réseau routier peut être analysé sous différents angles, tels que ceux définis par SARI, sa visibilité et lisibilité, mais aussi la géométrie et l'adhérence de sa chaussée. Le trafic pris dans sa globalité est également une composante du procédé qui peut être analysé au travers de mesures telles que le nombre de véhicule/heure, le nombre d'accident/incident et vitesses pratiquées. *L'analyse des tâches humaines prescrites* peut se réaliser au moyen de modèles de tâches de conduite. La principale référence dans notre cas est le code de la route.

C'est ce même modèle qui est aussi utilisé dans la phase ascendante d'évaluation. Les modèles généraux de l'opérateur humain et de son activité, souvent issus des sciences humaine et sociale, permettent de disposer de connaissances préalables pour orienter la conception et les évaluations. Ce sont des modèles génériques ou issus d'autres domaines d'application mais dont les problématiques sont similaires. Aidée de ces modèles, l'analyse des tâches prescrites permet l'identification *des besoins en assistance*. Dans notre cas, c'est une inadéquation entre la signalisation telle qu'elle existe aujourd'hui et un réseau présentant certaines difficultés que le besoin de développer une nouvelle signalisation, notamment dynamique, est apparu. Cette nouvelle signalisation constitue les choix *d'outils d'aide à la décision* et les choix *des modes de coopération*. Plusieurs choix ont été faits, ils sont présentés dans le paragraphe suivant. Ils spécifient l'information à présenter aux conducteurs (quand, quoi, comment) pour influer sur leur comportement. *Les critères ergonomiques* sont pris en compte pour définir l'interface du système homme-machine, notamment le support de la signalisation.

La phase ascendante a pour objectif d'évaluer le système homme-machine défini par la phase descendante. L'analyse porte principalement sur l'activité cognitive de l'opérateur, puisqu'il ne s'agit pas ici d'évaluer le système seul du point de vue de son fonctionnement (fiabilité, robustesse) cette étape étant à réaliser au préalable, mais du point de vue de son interaction avec l'utilisateur. Les systèmes évalués peuvent être réels s'ils ont été complètement spécifiés et développés, ou simulés si des étapes intermédiaires de validation sont nécessaires. Le contexte d'utilisation du système est défini par la mise au point de protocoles expérimentaux qui intègrent la définition des scénarios et des mesures à effectuer. Les scénarios doivent être construits de façon à déclencher des échanges entre l'utilisateur et la machine. Plusieurs conditions expérimentales et systèmes présentés dans les paragraphes suivants permettent d'illustrer la démarche méthodologique proposée, ainsi que l'intérêt de son utilisation.

3. Application de la méthode en U à SARI

Après avoir présenté les principes de fonctionnement de la méthode en U, ce paragraphe l'illustre par quelques applications. Deux sous-parties proposent successivement la phase descendante puis la phase ascendante. Pour bien appréhender les systèmes homme-machine élaborés dans le cadre de SARI, nous avons dans un premier temps défini un modèle simple du procédé dynamique qu'est la conduite automobile. Ce modèle permet d'identifier tous les acteurs, tant la position de l'homme, que celle des différents dispositifs étudiés. Ainsi, le processus global de régulation en conduite automobile, tel qu'étudié dans le cadre de ce projet, peut se représenter de façon simplifiée comme proposé sur la figure 2. Le conducteur agit sur son véhicule et conduit de façon à ce que sa trajectoire soit sécurisée. Cependant, par inattention ou non respect du code de la route, la trajectoire peut s'avérer dangereuse. Un premier système s'attache donc à détecter ce risque en établissant un diagnostic de la trajectoire du véhicule. Si elle est inadaptée aux conditions de conduite alors un deuxième système est déclenché de façon à alerter le conducteur du risque et à l'inciter à modifier son comportement. Le troisième système présenté sur la figure 2 est celui qui consiste à diagnostiquer les risques issus de l'environnement de conduite. Ce système analyse les conditions de circulation, dans le cas présent des gênes en provenance du trafic et une dégradation de l'état de la chaussée du fait des conditions météorologiques. De même que pour la détection de risque sur le véhicule, un risque identifié sur l'environnement de conduite provoque le déclenchement du système d'alerte. Cependant, tous les axes routiers ne sont pas dangereux et pour détecter ceux présentant le plus de difficulté un dernier type de système a été élaboré. Embarqué sur des véhicules auscultateurs, ce système construit un diagnostic

d'itinéraire. Le résultat permet d'identifier les portions routières le plus dangereuse et donc les plus à même d'être équipées des systèmes de diagnostic et d'alerte cités ci-dessus.

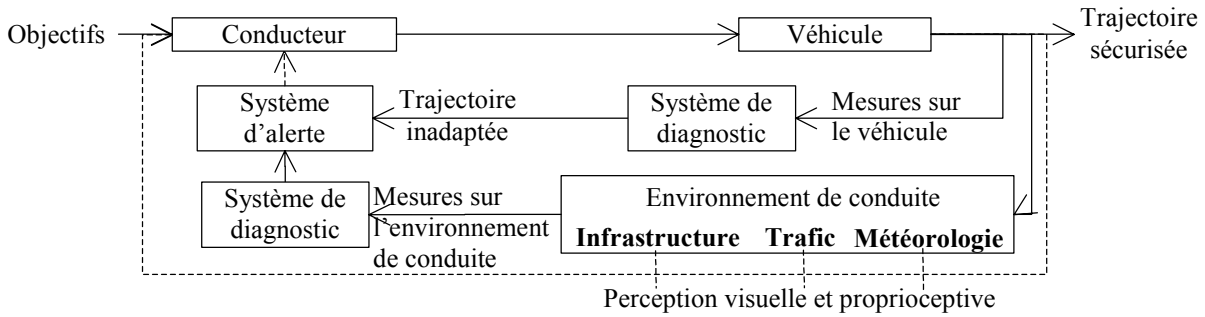


Figure 2 – Processus de régulation en conduite automobile

Les thèmes techniques de SARI ont développé et testé un de ces types de système, voire les trois types suivant le risque étudié. Le paragraphe suivant présente la phase descendante de conception d'un des thèmes techniques, le format de la communication ne pouvant se permettre d'en présenter l'ensemble. L'ensemble des résultats peut être consultable dans le rapport 1.5 du thème AJISE de SARI (Pacaux et Crévits, 2010). La phase ascendante présente une synthèse des expérimentations qui ont été réalisées dans tous les thèmes de SARI. Les résultats proviennent d'une analyse en profondeur réalisée à partir des rapports fournis par l'ensemble des partenaires du projet. Une centaine de rapports ont ainsi été étudiés afin d'extraire les informations requises pour appliquer la méthode.

3.1 Phase descendante de conception des systèmes Homme-Machine

De par l'organisation du projet SARI, la phase descendante de conception a principalement été assurée par les thèmes techniques. Leurs rôles consistaient surtout à évaluer la faisabilité technologique des systèmes, à construire ces systèmes puis à les évaluer du point de vue de leur performance technique en termes de fiabilité et de robustesse. par contre, les informations présentées par les systèmes d'alerte ont été imaginés au sein de groupes de travail « systèmes d'information », dont les réunions de travail réunissaient à la fois des partenaires des thèmes techniques et des partenaires du thème transversal AJISE. Des représentants des sciences de l'ingénieur et des sciences humaines et sociales pouvaient ainsi confronter leurs points de vue sur la définition de la signalisation qui tiendrait lieu d'alerte. Sur ce point de vue la démarche proposée par la méthode en U a en partie été respectée.

Le tableau 1 présente une synthèse des systèmes qui ont été élaborés et évalués au sein du thème IRCAD. Ce thème s'est donné pour but de diagnostiquer une dégradation de l'adhérence de la chaussée due à une condition météorologique dégradée, un comportement de conduite inadapté pour faire face à cette dégradation et d'en avertir l'usager. Ce thème a cherché à parcourir l'ensemble des types de système. Un diagnostic d'itinéraire est réalisé par le passage de véhicules auscultateurs de façon à détecter les causes de perte de contrôle liées aux caractéristiques de la chaussée. Contrairement aux autres thèmes IRCAD a cherché à évaluer différents types de systèmes d'alerte. De plus, les systèmes étudiés ont été imaginés avec plusieurs modalités de fonctionnement.

La méthode ne permet pas de mener des comparaisons précises entre les différents systèmes, ni même de voir la complémentarité entre les systèmes mais elle a permis de les identifier de façon rigoureuse. On note néanmoins des contextes de fonctionnement et des modèles d'usagers différents, points d'entrer qu'il pourrait être intéressant d'exploiter pour une meilleure définition des systèmes.

Tableau 1 – Exemple des phases de conception dans SARI / IRCAD.

Phase descendante de conception du système H-M						
Caractéristiques techniques du procédé	**Conduite en condition météo dégradée : perte de contrôle sur chaussée mouillée**					
Analyse du procédé et du système de commande	Système de diagnostic itinéraire	Système de diagnostic chaussée mouillée	Système de diagnostic conducteur	Système d'alerte conducteur (1)	Système d'alerte conducteur (2)	Système d'alerte conducteur (3)
Contexte de fonctionnement	Système embarqué supervisé	Système bord de voie autonome	Système bord de voie autonome	Système bord de voie autonome	Système bord de voie autonome	Système bord de voie autonome
Modèle de l'OH (limites, ressources)	Conducteur expert, véhicule en parfait état		Usagers (véhicule isolé)	Usagers (Classification AJISE)		
Analyse des tâches humaines prescrites	Analyse par accidentologie	Analyse de la chaussée	Analyse des vitesses			
Besoin d'assistance	Gestionnaire	Conducteur	Conducteur (15% des plus rapides)			
Choix d'outils d'aide à la décision	Calcul de risque adhérence sur itinéraire	Calcul de risque adhérence temps réel	Vitesse	Chaussée glissante et vitesse excessive		Vitesse excessive
Choix des modes de coopération	-	-	-	Trois modes définis	Deux modes définis	Un mode défini
Type d'aide	-	-	-	Aide à la prise de décision et à l'action		
Besoin d'informations	Aide à la prise de décision pour le gestionnaire			Etat chaussée - Vitesse excessive		
Spécification des interfaces H-M	Environnement embarqué		Radar	2 PMV	1 PMV	Plots lumineux sur le sol
Critères de conception	Règles de l'art	-	-	Ergonomie / Guide signalisation		
Réalisation Intégration	Modèles pluie, vent, dynamique véhicule	Station météo + Capteur hauteur d'eau		Commande par vitesse et hauteur d'eau		
Modèle de tâches humaines prescrites	-	-	Code de la route et adaptation	Code de la route		Pas de référence pour de l'alerte

3.2 Phase ascendante d'évaluation des Systèmes Homme-Machine

Il a été nécessaire de décomposer la phase ascendante d'évaluation des systèmes en fonction des thèmes, des types de systèmes et du type d'évaluation réalisé. Ainsi, les systèmes de diagnostic étaient évalués du point de vue de la validité et performance techniques par les thèmes techniques ; par contre l'impact des systèmes a principalement été évalué par le thème transversal AJISE. Le déroulement de la méthode sur la phase d'évaluation de la méthode a conduit à établir un bilan des expérimentations. Une clarification était nécessaire sur l'identification et l'apport des différents types d'expérimentation. La méthode n'ayant pas prévu la comparaison de leurs résultats, d'autres tableaux ont été construits sur la base de nouveaux critères. Certains résultats sont en effet très liés au contexte dans lequel ils ont été obtenus. Les critères permettent ainsi de caractériser les contextes expérimentaux par les caractéristiques de la population étudiée, le nombre de participants, le nombre d'expérimentations, le type de données recueillies, le scénario de conduite étudié et son contrôle (Tableau 2).

Le type de recrutement des conducteurs est un critère important puisqu'il définit la population des participants. Les thèmes techniques ont adopté deux approches, l'étude des flux de véhicules sur route réelle (tout conducteur enregistré à son insu) et l'utilisation des systèmes par des conducteurs experts. Dans le thème transversal AJISE, la procédure était différente. Deux approches ont aussi été exploitées. Dans un premier temps des conducteurs ont été recrutés pour réaliser des expérimentations en laboratoire. Ces conducteurs avaient conscience qu'ils étaient enregistrés. Ils ont participé soit à des expérimentations sur table lorsqu'il s'agissait de répondre à des questions posées suite à une description écrite ou par film d'une situation de conduite ; dans ces cas la situation est imaginée par le conducteur pour déduire une interprétation et un comportement. Des expérimentations étaient aussi organisées sur simulateurs de conduite et sur route privée. L'objectif était d'analyser le comportement déclaré et effectif des conducteurs dans une ou plusieurs situations de conduite, interagissant avec plusieurs modalités de système d'alerte. Dans un second temps, des enregistrements ont été opérés sur des routes réelles équipées ou non des systèmes de diagnostic et d'alerte. Comme pour les thèmes techniques, des mesures liées à la trajectoire ont été enregistrées, mais en supplément les conducteurs ont été stoppés, peu après le site sur une zone sécurisée, pour répondre à un ensemble de questions. Ainsi, les expérimentations se diversifient non seulement par le type de population mais aussi par le nombre de participants par expérimentation. Le nombre de participants conditionne la significativité des résultats et donc leur répétabilité sur d'autres sites que ceux étudiés. Les types d'expérimentation conditionnent par contre les catégories de conducteur. Ainsi, sur simulateur de conduite ou sur route privée le faible nombre de participants implique de restreindre la variabilité entre conducteurs. Su route réelle la variabilité est influencée par les horaires de recueil des données. En effet, l'arrêt des conducteurs se faisait sur des horaires tels que seuls les conducteurs motivés et disponibles ont répondu aux questionnaires. Les expérimentations varient également en fonction des types de données recueillies. Les données varient en quantité suivant les possibilités de déploiement de capteurs (sur l'environnement de conduite, la trajectoire pratiquée, le conducteur), mais aussi en qualité suivant les possibilités de contrôle du scénario (météo, présence de piétons, de véhicules lents, de travaux, …) et du recueil (perte ou dégradation de capteurs par exemple).

4. Discussion

La méthode a été appliquée aux trois thèmes techniques de SARI à l'issue du projet, alors que l'ensemble des expérimentations avaient été réalisées et donc les systèmes stabilisés. Bien que prévue dés le début du thème transversal du projet elle n'a pu se déployer dès le démarrage. Des thèmes techniques avaient en effet initié leur recherche et les spécifications des systèmes et types d'expérimentation étaient déjà définis. Une autre difficulté est le nombre de partenaires dans le projet et la diversité des disciplines impliquées. Plus de quarante partenaires, provenant des secteurs public et privé, des Sciences de l'Ingénieur et des Sciences Humaines et Sociales, ont été amenés à collaborer sur certaines phases du projet. Les partenaires du projet étaient souvent associés à l'élaboration et à l'évaluation d'un type de système, les interactions avec les partenaires des autres phases ne se faisant que très rarement si ce n'est au cours de rencontres formelles pendant des réunions d'avancement ou de démonstration. Ce dernier type de réunion, étant moins formel que le premier, semblait d'ailleurs plus propice aux échanges. L'un des atouts de ces rencontres étaient notamment le partage du contexte de travail et des systèmes évalués.

Tableau 2 – Exemple des phases dévaluation dans SARI.

	RADARR	**IRCAD**			**VIZIR**	
Expérimentations	**Virage**	**Météo dégradée**			**Carrefour**	**Haut de côte**
sur table	X	X			X	X
Recrutement	Permis B - volontariat - abordés dans la rue					
Nb expérimentations	5					
Nb participants	400 en moyenne par expérimentation					
Type de données	Réponses aux questionnaires - Pas de vérification de comportement déclaré					
Scénario	Description orale d'une situation de conduite					
Contrôle du scénario	Dépendant de la compréhension du participant					
sur simulateur	-	-			X	X
Systèmes d'alerte	-	-	-	-	1 PMV	Marquage
Dynamique	-	-	-	-	Non	Oui/Non
Recrutement	Permis B - volontariat - via site internet / personnel local					
Nb expérimentations	5					
Nb participants	40 en moyenne (2h/participant) par expérimentation					
Type de données	Réponses aux questionnaires - Trajectoire et actions du conducteur - Aucune difficulté de synchronisation entre l'ensemble des données					
Scénario	Mise en situation sur simulateur de conduite (sur table, fixe, dynamique)					
Contrôle du scénario	Correct excepté si le participant adopte un comportement excessif (vitesse trop faible ou trop élevée) - Familiarisation au véhicule et à l'environnement de conduite					
sur route privée	-	-	-	X	-	-
Systèmes d'alerte	-	-	-	Plots	-	-
Dynamique	-	-	-	Oui	-	-
Recrutement	Permis B - volontariat - personnel local					
Nb expérimentations	1					
Nb participants	26 en moyenne (1h/participant) par expérimentation					
Type de données	Réponses aux questionnaires - Trajectoire et actions du conducteur - Quelques difficultés de synchronisation entre la trajectoire et les actions conducteur					
Scénario	Mise en situation sur route privé					
Contrôle du scénario	Présence d'un expérimentateur dans le véhicule - Familiarisation au véhicule					
sur site	X	X			X	
Systèmes d'alerte	Flashs	1 PMV	2 PMV	-	1 PMV	Marquage
Dynamique	Oui	Oui	Oui	-	Oui	Oui/Non
Position	Verticale	Verticale	Verticale	Horizontale	Verticale	Horizontale
Modalités						
Allumage	Simultané	Alternat	Simultané	Simultané	Simultané	-
Déclenchement	Amont	Amont	Amont	Amont, pendant	Amont	-
Alerte générale	-	A4 + "Rappel"	A4 + "Rappel"	-	-	Deux aménagements
Alerte individuelle	Flashs	A1 + "Ralentir"	A1 + "Ralentir" puis "Ralentissez"	Allumage	"Carrefour dangereux" + "Attention"	-
Alerte individuelle ciblée	-	-	Immatriculation	-	-	-
Affichage neutre	Pas allumé	Pas allumé	Pas allumé	Pas allumé	Asterics	-
Panneau explicatif	Oui	Non	Non	Non	Non	Non
Recrutement	Permis B - volontariat - conducteur tout venant					
Nb expérimentations	4	4	5	-	3	4
Nb participants	100 en moyenne (20min/participant) par expérimentation					
Type de données	Réponses aux questionnaires - Trajectoire - Difficulté de synchronisation entre les de données					
Scénario	En cours de conduite					
Contrôle du scénario	Pas de contrôle (météo, trafic, piéton, …) - Familiarisation ou non à l'environnement de conduite					

L'identification des types de système a mis en évidence le manque de liens entre les différentes étapes de la méthode. Il ressort non seulement dans les étapes de conception des différents systèmes mais aussi dans les étapes d'évaluation, surtout entre les différents types d'évaluation. Des moyens ou des résultats issus d'un des thèmes, ou d'une des étapes d'évaluation des dispositifs auraient pu être partagés et confrontés. Des biais expérimentaux apparaissent dans de nombreuses expérimentations dès qu'elles sont déployées dans des environnements peu contrôlables telle la route, ou avec de faibles échantillons quelques fois peu représentatifs de la population visée. Le problème des facteurs confondus et de la représentativité des échantillons est souvent négligé (Elvik, 2003). Cet auteur précise par ailleurs qu'il ne suffit pas de mesurer les effets mais qu'il est important d'identifier tous les facteurs pouvant influer ces effets. Ainsi, la confrontation des résultats obtenus dans SARI pourrait, par exemple, amener à compenser une faible taille d'échantillon d'expérimentations centrées sur le conducteur par de grands échantillons d'expérimentations centrées sur les véhicules. Et inversement, le faible contrôle des facteurs lors de la récupération de grands échantillons peut être compensé par un meilleur contrôle expérimental et une analyse en profondeur des résultats obtenus sur des petits échantillons. Cette recherche de complémentarité n'a vraiment été réalisée que sur l'axe « Sommet de côte » du thème VIZIR (Briand et al., 2010). Des comportements similaires ont en effet été relevés sur simulateur de conduite (petits échantillons) et sur route réelle (grand échantillon). Concernant le risque d'obtenir des résultats issus de facteurs confondus, il est intéressant de remarquer que l'organisation de SARI permet de contrôler en partie ce risque. En effet, l'identification des ruptures telles que proposées par SARI a incité le développement de systèmes de diagnostic d'itinéraire. Ainsi ces outils, quasiment opérationnels à la fin du projet, permettent par exemple de savoir, pour un site accidentogène particulier, si les pertes de contrôle sont dues à une ou plusieurs ruptures. Une étude générale sur les flux de véhicule permet ensuite d'identifier le comportement des usagers courants. Le comportement peut ensuite être expliqué par des expérimentations en simulateur de conduite ou sur route mais avec arrêt des conducteurs. La manipulation de données quantitatives similaires entre les différentes expérimentations, complétées par des données qualitatives des réponses aux questionnaires peut ainsi faciliter de contrôle des facteurs. L'expérimentation peut cependant avoir un effet sur le comportement des participants. Les effets d'ordre et d'apprentissage peuvent facilement être contrôlés par des expérimentations en laboratoire. Ils le sont moins lorsque les expérimentations se déroulent sur route. Ainsi, des auteurs distinguent l'acceptabilité de l'acceptance, l'acceptabilité relevant davantage de la perception d'un traitement ou d'un système par l'usager avant toute implémentation et l'acceptance relevant de sa perception après implémentation (Schuitema et al., 2010). Les auteurs soulignent que le questionnement des usagers sur la future implémentation d'un dispositif modifierait leurs croyances sur l'impact du dispositif. Mais ce point qui se rapproche des aspects d'apprentissage et de formation des conducteurs sur les dispositifs, qu'ils soient embarqués ou en bord de voie, constitue une difficulté dans la conduite automobile puisqu'ils doivent être évités.

5. Conclusion

La méthode en U a permis de se poser des questions et de mener une réflexion en profondeur sur les mesures, le contexte de leurs recueils et les résultats qu'elles produisent. Elle a cependant montré son inadéquation pour le suivi de projets de grandes envergures tels que SARI. Elle convenait parfaitement à l'étude des systèmes pris indépendamment pour une évaluation intégrant les aspects techniques et humains. Elle ne suffit pas lorsqu'il est nécessaire de l'utiliser pour comparer des systèmes, ou lorsque plusieurs autres critères tels que l'économie, le juridique ou la psychologie sociale doivent être pris en compte. Mais à parcourir les présentations de méthode qui ont pu être utilisées au travers d'études ayant les

mêmes objectifs de sécurité routière que SARI, le constat est fait qu'il n'existe pas aujourd'hui de méthode qui permette le contrôle d'aussi nombreux paramètres que ceux identifiés dans SARI. Les méthodes existantes couvrent une partie des besoins et les liens permettant de les connecter sont à rechercher. Cependant, si une telle méthode peut être mise en place, son exploitation n'en restera pas moins difficile. Elle devra fournir les arguments qui permettront le transfert des objectifs et objets de recherche vers des objectifs plus applicatifs, qui permettront les échanges entre la recherche, les experts du domaine et les ingénieurs et techniciens, et vise versa, qui permettront les échanges entre des partenaires d'origines disciplinaires très variées. De par son organisation SARI a permis de réaliser les premiers pas qui permettraient d'aboutir à une telle méthode et les efforts déployés mériteraient d'être entretenus.

Références

- Brangier, E., and Barcelina, J. (2003), « Concevoir un produit facile à utiliser », Editions d'organisation, Paris.
- Brangier, E., Hammes-Adelé, S., Bastien, J.-M.C. (2009), « Analyse critique des approches de l'acceptation des technologies : de l'utilisabilité à la symbiose humain-technologie-organisation », Rev. Eur. Psychol. Appl., doi :10.1016/j.erap.2009.11.002.
- Briand, P., Anceaux, F., Auberlet, J.-M., Aubin, S., Pacaux, M.-P., Plainchault, P., Rosey, F. (2010), "Impact of perceptual treatments on drivers behaviour: from the driving simulators studies to the field tests – first results", 89th Annual Meeting of Transportation Research Board, Washington, U.S.
- Elvik, R. (2003), "Assessing the validity of road safety evaluation studies by analysing causal chains", Accident Analysis and Prevention, 35, 741-748.
- Gallenne, M.L., Fournier, P. (2007), « SARI : un bel exemple de partenariats entre les collectivités territoriales et les organismes de recherche du RST (réseau scientifique et technique de l'Equipement », revue TEC, juin.
- Gould, J. D. and Lewis, C. (1985), "Designing for usability: Key principles and what designers think", Communications of the ACM, 28, 3, 300-311.
- Millot P., (1988), « Supervision des procédés automatisés et ergonomie », Paris: Hermes, Collection Traitement des nouvelles technologies. Série Automatique.
- Millot, P. and Debernard, S. (1993), "Men machines cooperative organizations: Methodological and Practical Attemps in air trafic control", IEEE SMC, Le Touquet. France, octobre.
- Millot, P. and Roussillon, E. (1991), "Man-Machine Cooperation in Telerobotics: Problematic and Methodologies", in Proc. of the second Symposium on Robotics. Institut Nationale des Sciences et Techniques Nucléaires, Gif-sur-Yvette, France.
- Nielsen, J. (1993), Usability Engineering, Academic Press, London.
- Pacaux-Lemoine, M.-P. et Crévits I. (2010) « Approche méthodologique », Livrable SARI/AJISE 1.5, janvier.
- Royce, W. (1970), "Managing the development of large software systems", in Proc. IEEE Western Computer Conf., Los Almitos, CA. IEEE computer Society Press.
- Schuitema, G., Steg, L., Forward, S. (2010), "Explaining differences in acceptability before and acceptance after the implementation of a congestion charge in Stockholm", Transportation Research Part A, 44, 99-109.
- Tricot, N. (2004), « Conception et évaluation de systèmes coopératifs avancés d'aide à la conduite automobile », Thèse de doctorat spécialité automatique industrielle et humaine, université de Valenciennes, France.

ACCEPTATION DU CONTROLE AUTOMATISE EN LOIRE-ATLANTIQUE. DISCUSSIONS CROISEES DE PROFESSIONNELS ET DE NON-PROFESSIONNELS

Docteur en psychologie sociale (Université de Provence-2005). Chargée de recherche au sein de l'Equipe de Recherche Analyse de l'Action Publique de Sécurité Routière (ERA AAPSR) du CETE de l'Ouest. Mes travaux portent sur les actions publiques de sécurité routière

Docteur en science politique (IEP Paris-2000). Chargé de recherche au Département Economie et Sociologie des Transports de l'INRETS. Mes travaux portent sur les politiques publiques de sécurité, de sûreté et de mobilité.

Chloé EYSSARTIER
ERA AAPSR
Division Exploitation Sécurité
CETE de l'Ouest
Université de Nantes, Nantes, France

Fabrice HAMELIN
DEST
Institut National de Recherches sur les Transports et leur Sécurité
Université Paris-Est, Marne la Vallée, France

Résumé

L'introduction, en 2003, du recours à l'automatisation pour le contrôle et la sanction des infractions au code de la route a introduit un changement majeur dans la politique de sécurité routière en France. L'objet du papier est de saisir comment cette innovation est « acceptée » par ceux qui en sont les destinataires, d'autant que le recours à l'automatisation a été étendu au franchissement des feux rouges en 2009, en attendant l'introduction de la lecture automatisée des plaques d'immatriculation. La réalisation de focus groups, au cours du second semestre 2009 à Nantes, réunissant des agents d'exploitation, des forces de l'ordre et des représentants de la société civile fournit le matériau empirique du papier. Son ambition est d'affiner les connaissances détenues sur l'acceptation du recours à l'automatisation par ces groupes, porteurs d'intérêts différents, et de dialoguer avec la littérature anglo-saxonne existante sur le sujet.

Mots-clés: Sécurité routière, acceptation professionnelle, instruments de politiques publiques, entretiens collectifs, automatisation, radars.

Abstract

In 2003, the introduction of automated traffic enforcement devices introduced a major change into the road safety policy in France. The object of the paper is to seize how this innovation is "accepted" by those who are the addressees, as far as the appeal to the automation was widened to red lights in 2009 and before the introduction of Automatic Number Plate Recognition. The realization of groups focus, during the second half-year 2009 in Nantes, gathering operational agents, traffic police officers and community representatives supplies the empirical material of this paper. Its ambition is to refine the knowledge detained on the acceptance of the automated traffic enforcement by these various groups of interests, and to have a dialogue with the Anglo-Saxon literature on this subject.

Keywords: Traffic safety, professional acceptance, public policy instruments, focus groups, automated traffic enforcement.

1. Contexte et problématique de la recherche

L'introduction, à partir de 2003, de radars automatiques a produit un changement majeur dans la politique de sécurité routière en France qui a été le plus souvent appréhendé en termes d'efficacité, de financement ou de paramétrage technique. Il convient donc de saisir comment cette innovation est reçue - on dira ici « acceptée » - par ceux qui en sont les destinataires. Cette démarche est d'autant plus d'actualité que le recours à l'automatisation a été étendu au franchissement des feux rouges en 2009, en attendant l'introduction de la lecture automatisée des plaques d'immatriculation et le procès verbal électronique.

Des travaux de recherche ont été menés à l'INRETS sur ce thème (Hamelin, 2008) faisant suite à des travaux d'expertise (ONISR, 2006). Le travail présenté ici s'inscrit dans la continuité de ces premières recherches, mais à partir d'une orientation méthodologique renouvelée (Eyssartier et Hamelin, 2009), qui passe par le recours à des « entretiens collectifs » (Duchesne et Haegel, 2008). Trois focus groups, réalisés au cours du second semestre 2009, avec des agents d'exploitation, des agents des forces de l'ordre et des représentants de la société civile organisée fournissent le matériau de cette communication. Ce programme de recherche, financé par la DSCR, est mené en partenariat par une équipe de l'INRETS et du CETE de l'Ouest.

L'objectif de la communication est de souligner l'intérêt scientifique du recours à la notion d'acceptation, en présentant d'abord les apports de la méthodologie utilisée sans faire abstraction des difficultés rencontrées, puis en indiquant les résultats obtenus auprès des populations interrogées.

2. L'acceptation de l'automatisation du contrôle des infractions au code de la route : quelle méthode d'analyse ?

Le recours aux notions d'acceptation et d'acceptabilité a une pertinence scientifique pour évaluer les instruments de l'action publique de sécurité routière, à condition d'interroger et de déconstruire les notions d' « acceptabilité/acceptation sociales » et aussi d'identifier les atouts et les limites des méthodes utilisées pour les saisir, ici celle des focus groups.

2.1 Construire les conditions d'un usage scientifique des notions d'acceptation/ acceptabilité sociales

Les réticences des analystes des politiques publiques à recourir à ces notions proviennent d'une méfiance à l'égard d'un possible usage politique. Il convient donc d'identifier les conditions d'un usage scientifique.

Une méfiance à l'égard d'un usage politique des notions

Les notions d'acceptation et d'acceptabilité peuvent se définir très simplement. L'acceptabilité renvoie aux attitudes et réactions qu'un individu peut avoir à l'égard du dispositif ou de l'objet étudié sans qu'il en ait fait l'expérience ; l'acceptation renvoie au contraire aux réactions et attitudes vis-à-vis de quelque chose dont il a l'expérience. Dans le cadre de ce travail, la première notion s'applique au contrôle automatisé des vitesses, déployé à partir de 2003, et la seconde au contrôle automatisé du franchissement des feux rouges qui, dans l'agglomération nantaise, n'est pas encore opérationnel au cours de la période d'enquête. Mais, dans le cadre d'une analyse politologique des politiques publiques, lorsque ces notions sont utilisées, elles caractérisent soit le résultat soit le produit d'un travail politique et/ou administratif de légitimation de l'action des pouvoirs publics (Hamelin, 2007). La notion

caractérise alors « la limite étroite » dans laquelle le gouvernement peut inscrire les mesures qu'il préconise en ayant des chances d'être obéi (Cunegatti et Suaud, 2008). Les travaux engagés sur ce thème sont alors perçus comme étant destinés à identifier cette « limite étroite » voire à s'interroger sur les mesures à prendre pour favoriser l'acceptation de tel ou tel groupe d'usagers et plus largement de l'opinion publique (Delaney, Ward et Cameron, 2005). Conformément à l'exemple du tableau 1, dans les discussions collectives, des interviewés ont dénoncé le manque de « consultation » des publics concernés.

Tableau 1 – Propos tenus par les représentants d'associations sur le manque de consultation

RA3. On est là aujourd'hui, on nous dirait : on a l'intention de… Là, on se trouve devant le fait accompli. On vous demanderait quels sont les critères et on se déplace. Vous êtes venus nous demander mais c'était déjà fait [rire de tous les participants].
RA4. Allons voir ensemble, allons-y. Qu'est-ce que vous en pensez ?
RA3. Oui, on est un groupe, allons-y…

A d'autres moments, les entretiens ont été appréhendés, par les interviewés, comme une opportunité pour faire passer des messages à ceux qu'ils identifient alors comme des relais dans le processus décisionnel. Face à ces usages et à la méfiance à l'égard des travaux portant sur l'acceptation du changement dans l'action publique, notre démarche a d'abord consisté à établir les conditions d'une utilisation scientifique de ces notions dans le cadre d'une analyse de politiques publiques. Au-delà de l'adoption d'une méthodologie d'enquête rigoureuse, la solution passe aussi par un travail de déconstruction des notions d'acceptabilité et d'acceptation sociales, tel qu'il est opéré dans plusieurs travaux anglo-saxons.

La déconstruction de la notion d'acceptabilité sociale

La plupart des travaux existants s'intéressent à l'acceptation/acceptabilité des publics à qui sont destinés les politiques, c'est-à-dire aux ressortissants agrégés. L'acceptation comme l'acceptabilité sociales sont alors le produit d'un instrument particulier qui est le sondage d'opinion, c'est-à-dire d'une mesure quantitative de la réception de l'innovation par un public défini au préalable, au regard des réponses qu'il fournit à un questionnaire. Cette démarche n'est pas pleinement satisfaisante pour l'analyse des politiques publiques.

Pour obtenir l'adhésion à une mesure, il faut motiver et impliquer les acteurs qui en ont la charge et ceux à qui cette politique va être imputée. Sur ce volet de l'action publique de sécurité routière, il est donc essentiel de pouvoir appréhender l'acceptation du dispositif par les autorités politiques locales, les groupes professionnels directement concernés et différents porteurs d'enjeux organisés. La formule de *community acceptance* incorpore cette dernière dimension. Elle renvoie à une dimension de voisinage physique et social, au sens où la communauté partage un même territoire mais aussi des valeurs et des intérêts communs. Les notions d'usagers et de riverains n'y renvoient donc que partiellement. La notion de « société civile locale » est plus pertinente en France, d'autant que les travaux existants sur cette dimension interrogent des représentants du monde associatif local, qu'ils soient issus de groupements civiques, à caractère religieux ou d'origine scolaire (Wissinger, Hummer et Milazzo, 1999). Les notions d'acceptation politique (*political acceptance*) et professionnelle (*professionnal acceptance*) parachèvent la déconstruction de la notion d'acceptation sociale.

Dans la littérature, les professionnels interrogés sont le plus souvent des policiers de la route, parfois des agents (ingénieurs, techniciens) des administrations en charge de la circulation et plus rarement les membres du système judiciaire (Fontaine, Schrock et Ullman, 2002 ;

Cunningham et Hummer, 2004). Les gendarmes et policiers de la route font partie des populations étudiées dans notre étude, d'autant que les travaux sur le déploiement des dispositifs automatisés en France ont souligné le rôle central de ce groupe (Ternier et al., 2003, Hamelin 2008). Pour ce même motif, nous avons également interrogés les agents d'exploitation des infrastructures routières, qu'ils appartiennent au Conseil Général de Loire-Atlantique ou à la Direction Interdépartementale des Routes Ouest (DIRO). Ce groupe de professionnels n'a pas été étudié dans les travaux sur l'automatisation, alors que leurs activités professionnelles sont essentielles à l'installation et à l'entretien des dispositifs fixes. Les représentants de la « société civile organisée » font également partie des publics auxquels s'intéressent les chercheurs anglo-saxons. Les résultats obtenus identifient des représentations en net décalage avec la stratégie de déploiement des radars automatiques en France. L'interrogation de chacun de ces groupes permet de saisir plus finement « l'acceptation » du contrôle automatisé des vitesses en Loire-Atlantique par différents porteurs d'enjeux, à la condition d'utiliser une méthode d'enquête et d'analyse qui en saisisse toutes les dimensions.

2.2 L'évaluation permise par la méthode des focus groups

Pour cela, nous avons opté pour la méthode des focus-groups qui présente des difficultés mais également pour notre travail des avantages au regard des sondages d'opinion comme des entretiens individuels même approfondis. Par conséquent, nous avons réalisé trois entretiens de groupe présentés dans le tableau 2.

Tableau 2 - Les trois focus groupes réalisés

	Participants
Groupe 1: Forces de l'ordre Date: 10 septembre 2009 Durée: 2h35	FO1 – Major sécurité routière circulation, DDSP FO2 – agent circulation, DDSP FO3 – Gardien de la paix, DDSP FO4 – Adj-Chef Cdt peloton autoroute, GDGN FO5 – gendarme BMO, GDGN FO6 – Brigadier Chef, BMO - GDGN
Groupe 2: Agents d'exploitation Date: 29 juin 2009 Durée: 2h00	AE1 – agent d'exploitation DIRO AE2 – responsable centre d'intervention, Conseil Général AE3 – Chef d'équipe, Conseil Général AE4 – Agent d'exploitation, DIRO
Groupe 3: Représentants d'associations Date: 23 novembre 2009 Durée: 2h08	RA1 - Président association de locataire – gardien de stade RA2 – Dirigeant automobile-club – retraité – ingénieur RA3 – Président association de locataire – retraité – ambulancier RA4 – Dirigeant association usagers des transports en commun

Les difficultés de la méthode

Si en amont de la réalisation du focus group, la constitution des groupes est une réelle difficulté, au cours du déroulement, le principal problème réside dans la gestion équitable du temps de parole (Duchesne et Haegel, 2008). Il arrive qu'un individu, plus charismatique que les autres ou doté d'un statut social visiblement supérieur, oriente la discussion ou accapare la parole. De plus, les entretiens ont montré qu'une discussion sur l'automatisation revient très largement à « imposer une problématique » aux participants (Bourdieu 1972) ; c'est-à-dire à les faire intervenir sur un domaine qui ne suscite pas forcément d'interrogation chez eux. Les

participants ont alors tendance à s'écarter du sujet donné pour retrouver des questions avec lesquelles ils se sentent plus à l'aise. L'entretien collectif permet de détecter cette imposition de problématique et, à la différence du sondage d'opinion, donne aux animateurs l'opportunité de recentrer la discussion.

L'intérêt et les apports de la méthode

A travers l'organisation d'entretiens collectifs, nous ne recherchons pas la représentativité des groupes réunis, que nous fournirait le recours au sondage d'opinions, mais plutôt l'accès à un ensemble d'informations partagées par un groupe d'individus relativement homogène. Un focus group est un groupe d'individus sélectionnés et réunis par des chercheurs pour discuter et réagir, à partir de leur expérience personnelle, de leur perception d'un thème donné et cela dans un environnement permissif et non menaçant. L'entretien de groupe témoigne notamment des changements opérés dans les opinions exprimées au regard des informations et des raisonnements construits par les autres au fil de la discussion. Il permet ainsi de mieux saisir la consistance des opinions exprimées par les interviewés. La « dynamique du groupe » crée aussi les conditions d'un affinement des positions et des argumentaires. Du fait de l'homogénéité des groupes, de l'empathie des animateurs, un climat de confiance est instauré qui va faciliter la spontanéité du discours (Krueger et Casey, 2000). En outre, les controverses possibles entre interviewés et l'influence que les uns peuvent avoir sur les autres dans la discussion enrichissent les discours (Mucchielli 1996). Comme le montre le tableau 3, les participants s'adressent les uns aux autres et échangent sur des points particuliers.

Tableau 3 - Propos illustrant l'interaction entre les participants

RA3 J'ai une question à mon voisin de l'éducation nationale. Est-ce qu'il serait pour que le code de la route soit passé à l'école?
RA2 Ca fait vivre du monde. Laissons à l'école son devoir d'école
RA4 Les corps d'enseignants disent ne pas être formés pour ça ensuite. Ca pose des problèmes [...] Quand on fait entrer des gens des les écoles, c'est pas facile car les enseignants se sentent dépossédés.

3. L'acceptation de l'automatisation du contrôle des infractions au code de la route : quels résultats ?

Les discussions enregistrées ne nous renseignent pas uniquement sur le recours à l'automatisation et la perception de la sécurité routière, elles nous apprennent aussi beaucoup sur les usagers de la route, à condition d'avoir à l'esprit qu'on saisit dans les discours des interviewés « une catégorisation indigène des usagers » de la route (Boussard et al., 2006).

3.1 L'automatisation au prisme du cadrage du problème de la sécurité routière et des « catégorisations indigènes des figures de l'usager » de la route

Les échanges enregistrés offrent une illustration de la représentation dominante mais réductrice du problème de l'insécurité routière consistant à réduire l'acte de conduite à bien ou mal se conduire (Gilbert, 2008). La description des comportements au volant permet aussi l'esquisse de plusieurs figures d'usagers de la route, auxquelles le recours à l'automatisation du contrôle et de la sanction répond plus ou moins bien.

L'automatisation comme réponse au cadrage réducteur du problème de la sécurité routière

Que le problème de la sécurité routière soit d'abord vu comme le résultat d'un comportement inadapté des conducteurs, permet de mieux comprendre que la sécurité routière ne soit vue

que comme un problème d'ordre public, d'éducation et de communication. De manière plus précise encore, cette focalisation sur le comportement des conducteurs conduit, plusieurs des interviewés et notamment les policiers de la route, à une négation de la vitesse comme cause d'accident (tableau 4). La littérature a bien identifié le fait que la vitesse n'est pas perçue comme un problème essentiel de sécurité routière (Delaney et al. 2005).

Tableau 4 - Propos illustrant une opinion critique sur la vitesse

AE2 Chez nous [sur le réseau 2x2 voies dont il assure l'exploitation], c'est plutôt une mauvaise perception du réseau (…) ou la consommation d'alcool. La limitation de vitesse est à 90 km/h mais c'est plutôt le fait de nuisances sonores pour les riverains. FO5. Pour moi, l'accident c'est une cause humaine, c'est d'abord un facteur humain. La voiture ne roule pas toute seule. Mais il faut avant tout rechercher le comportement

Puisque la vitesse ne constitue pas, ou pas seule, le problème, le contrôle sanction automatisé de la vitesse ne peut logiquement pas offrir de solution au problème de la sécurité routière ! Pour le contrôle automatisé du franchissement des feux rouges, on n'enregistre pas de discours sur la dangerosité des franchissements de feu rouge, alors qu'il s'agit d'un aspect très présent dans la littérature (Cameron et al. 2003 ; Felonneau, Aigrot et Causse, 2006). Les interviewés expriment donc des doutes sur l'intérêt du dispositif pour la sécurité routière.

L'automatisation au prisme des différentes figures de l'usager de la route

Dans leur travail sur les activités policières, Boussard, Loriol et Caroly (2006) mettent en évidence trois catégories ou trois figures d'usagers de la voie publique construites par les policiers : le citoyen ordinaire, le mis en cause et la victime. Il est apparu intéressant de confronter cette typologie aux figures de l'usager de la route dessinées par les groupes étudiés.

Dans les entretiens enregistrés, les victimes de l'insécurité routière sont étonnamment peu présentes dans les discussions. On peut peut-être l'expliquer par le fait que les « vrais clients » des professionnels interrogés sont plutôt les usagers ordinaires voire les mis en cause, même si l'un et l'autre groupe ont affaire aux victimes d'accidents. En revanche, les discussions traitent de cette figure à travers la référence aux usagers « vulnérables ». Ce sont ici d'abord et essentiellement les enfants. En conséquence, les membres de la société civile souhaitent voir des dispositifs automatisés de contrôle des vitesses installés en ville (tableau 5), à des endroits jugés dangereux, comme la proximité des écoles (Kossman 2002). Cette solution n'est pas défendue par les professionnels, sans doute parce qu'elle relève d'une logique de déploiement différente de celle opérée au regard de l'accidentologie et de la circulation.

Tableau 5 - Propos illustrant une position favorable à l'installation de radar en ville

RA2. Alors là en ville, je serai tout à fait d'accord. Protégeons notre jeunesse. Elle se fait renverser en ville, ce n'est pas sur la route. Ce sera plus tard, en sortant de boite de nuit, mais là, il y aura alors d'autres choses : la drogue (…).

Les discussions enregistrées se focalisent principalement sur le « mis en cause » et le « citoyen ordinaire », quitte à ce que ceux-ci, mais surtout le second devienne, dans les entretiens, la « victime » du dispositif (tableau 6).

Tableau 6 - Propos sur le citoyen ordinaire

RA2. Les statistiques, on les fait parler comme on veut (…) Ce n'est pas parce qu'on aura piqué du fric à tous, qu'on aura fait progresser les choses, la taxe carbone, c'est pareil (…). Il y en a marre de payer partout (…).
RA4. N'empêche que c'est quand on met en place un système répressif qu'on a brutalement des améliorations dans les statistiques. Que les aspects financiers déplaisent, je suis d'accord (…)
RA2. Est-ce que vous pensez que les 13 000 personnes [flashées sur le périphérique] qui étaient entre 0 et 5 km/h au-dessus de la vitesse préconisée étaient des délinquants (…) ? Ce sont des travailleurs comme tout le monde. Beaucoup ne se sont pas rendu compte qu'ils étaient au-dessus de la vitesse (…).

Dans cette logique, ce sont aussi les effets secondaires ou indirects du dispositif qui sont mis en avant : une perte de points conduisant à un retrait de permis et à une perte d'emploi. A la victimisation des usagers ordinaires s'ajoute le fait que les vrais délinquants de la route ne sont pas considérés comme étant forcément ou particulièrement touchés par le dispositif.

3.2 L'automatisation confrontée aux identités et pratiques des groupes

Les discussions enregistrées permettent aussi de saisir les transformations des relations des professionnels des déplacements sur la route, et notamment les policiers de la route, à leur(s) public(s). Ils permettent de saisir les « rhétoriques professionnelles qui fondent ce qu'est le 'vrai travail' » des policiers de la route et l'identité professionnelle mise en jeu par le déploiement du dispositif (Boussard et al., 2006, p.212).

Automatisation et identité professionnelle

Le radar automatique est un outil dont l'introduction est a priori « déstabilisante » pour les pratiques et l'identité professionnelles des policiers de la route, puisque son déploiement constitue une réaction au phénomène des « indulgences », même si les pouvoirs publics présentent cet outil comme une solution technologique apportée aux difficultés du métier. (Hamelin, 2008). De plus, l'automatisation en supprimant l'interpellation, va à l'encontre de l'idéal incarné par la formule du gendarme et du voleur.

On ne peut en effet uniquement saisir la police comme un instrument d'application de la loi. Dans l'interaction quotidienne entre les professionnels, leur activité les amène au quotidien à distinguer le « vrai client » du « petit client » et du « faux client » (Boussard et al., 2006). Or, les radars automatiques sont des instruments de lutte contre les mauvais comportements du « petit client » ou du « faux client ». La mise en œuvre des dispositifs mobiles, qui les préoccupe plus particulièrement, les amène donc à descendre dans la hiérarchie morale des tâches professionnelles. De plus, l'outil ne permet pas « d'apprécier » la gravité de la faute et de l'« expliquer » à l'usager. Il n'autorise pas non plus l'usager à « s'expliquer ». Cela va à l'encontre de « l'autonomie pratique » du policier qui fonde l'intérêt de son métier.

Cet instrument entraîne donc le policier à mettre en œuvre des actions et des méthodes qui l'éloignent de ce qu'il considère être sa mission, d'où la volonté d'en confier la mise en œuvre à d'autres (tableau 7) et l'effort fait pour lui trouver un « intérêt ». Pour la hiérarchie, l'intérêt est d'abord gestionnaire (pouvoir répartir les effectifs sur d'autres missions) ; pour les agents sur le terrain, il vient « sécuriser » leurs interventions.

Tableau 7- Propos illustrant l'impact de l'automatisation sur les forces de l'ordre

FO1: L'automatisation prend moins de personnels car on sort seul. La nuit on est deux.
FO6 Pourquoi ce n'est pas l'équipement qui gère ses propres voitures? Nous la gendarmerie, c'est basé sur le contact.

Pour autant, le « vrai travail » des policiers et gendarmes de la route, c'est « l'interception » et/ou « l'interpellation ». Elle seule permet de « situer » l'acte de conduite, « d'apprécier » la faute et d'élargir la « recherche ». Bien que, contrairement aux agents des forces de l'ordre, le radar automatique ne soit pas un élément central du contexte de travail des agents d'exploitation de la route, les discussions mettent également à jour un impact sur leurs pratiques professionnelles. Dans un premier temps, les agents rencontrés déplorent que les contraintes d'exploitation des radars ne soient pas prises en compte lors de l'installation de radar. Ils suggèrent que *« dans les procédures, il* [y ait] *un point de validation de la part du gestionnaire »*. Les radars implantés en terre plein central (TPC) sont plus difficiles à entretenir que ceux implantés en bande d'arrêt d'urgence (BAU). L'entretien des radars sera d'autant plus contraignant qu'une nouvelle directive européenne imposera la neutralisation d'une voie lors de l'intervention sur TPC. Ce travail aura donc lieu de nuit pour des raisons de fluidité du trafic, ce qui est vécu comme une contrainte par les agents interrogés (tableau 8). De plus, cette mesure sera, selon eux, génératrice de comportements agressifs de la part des usagers à l'encontre des agents d'exploitation et occasionnera un coût supplémentaire pour la collectivité.

Tableau 8 - Propos illustrant l'impact de l'automatisation sur les agents d'exploitation

AE1. Là où on neutralise la voie, les usagers aiment de moins en moins(…) Donc nous, on va récolter des réactions de plus en plus négatives. On va se faire plus agresser.
AE2. Le travail de nuit a de toute façon un coût pour la collectivité : 10 heures de nuit fois 2 plus un chef d'équipe.

Un autre élément concerne la probabilité plus élevée d'être sanctionné pour les agents d'exploitation que pour le citoyen de par le fait qu'ils font plus de route, ce qui engendre un sentiment d'injustice. Conformément à leur identité professionnelle, la sécurité est un élément central de leurs discours. Ils échangent sur les usagers les plus dangereux - les 18-25 ans - et les conducteurs de PL. Toutefois, malgré ce sentiment constant d'insécurité au travail, l'installation de radars automatiques de chantier, bien qu'utile « pour être en sécurité » est accueillie très défavorablement. Dans leur identité professionnelle, à côté de la sécurité figure le souci de favoriser la circulation. Le rôle de l'agent d'exploitation de la route n'est pas « d'ennuyer » l'usager mais au contraire de lui permettre d'utiliser au mieux les infrastructures routières.

Automatisation et préoccupation d'acteurs engagés

Comme on l'a indiqué précédemment, les radars automatiques ne font visiblement pas partie de leurs préoccupations. Pour autant, les entretiens montrent une double évaluation du dispositif automatisé de contrôle par les ressortissants, à partir du contenu de la presse - en l'occurrence, la presse écrite généraliste et locale - et de l'expérience personnelle. Il est peu fait allusion aux discussions au sein des groupes primaires. On notera une appréhension « pratique » et « localisée » du dispositif et une évaluation reposant sur cette appréhension. Les entretiens regorgent en effet d'exemples localisés et de cas particuliers vécus par les

interviewés, ce qui tend à valider notre hypothèse initiale, selon laquelle la réception de ce nouvel instrument dépend des expériences quotidiennes et personnelles (tableau 9). Ce constat est cependant moins affirmé pour les professionnels et les experts.

Tableau 9 - Propos illustrant l'impact de la presse sur la perception de l'automatisation

RA1.J'ai lu ça, il y a pas longtemps ; j'ai le souvenir d'une photo. RA2. Moi, je passe très souvent devant.

Si le contrôle automatisé de la vitesse est plutôt perçu comme injuste, puisqu'il sanctionne les petits infractionnistes, le même raisonnement est tenu avec les radars feux rouges. Il s'y ajoute l'idée d'inutilité du dispositif puisque « les seules personnes qui seront verbalisées ce sont les fausses plaques, les jeunes qui ont piqué des voitures.. » et que le franchissement de feu rouge n'est pas un problème fréquent. Quant à la protection des usagers vulnérables, ils estiment que les Nantais sont plutôt respectueux des piétons. Pour des motifs généraux et locaux, ils ne perçoivent donc pas l'intérêt du dispositif. Pour eux, le dispositif qui serait utile en ville, c'est le radar vitesse. La vitesse, en milieu urbain, est considérée comme un problème à la fois en termes de dangerosité et de fréquence.

Que faut-il en conclure ? Il est possible qu'il y ait eu un déficit d'information, toutefois, informer ne suffirait sans doute pas. Il est maintenant admis (Beauvois et Joule, 1981) que l'être humain n'est pas un être rationnel. Il y a fort à parier, qu'il existe un a priori négatif sur le dispositif et que les informations allant à l'encontre de cette image seront soit ignorées, soient discréditées. Si informer ne suffit pas, mettre en place des démarches participatives et délibératives, où le citoyen serait impliqué et aurait un réel poids dans les décisions prises, serait une des solutions.

4. Conclusion

Bien que la méthode utilisée ne vise pas à une représentativité des groupes constitués, elle apporte des éléments de compréhension de l'acceptation des dispositifs automatisés peu ou moins bien saisis par le recours aux sondages d'opinion. Le traitement des entretiens collectifs réalisés permet de retrouver les grands indicateurs de l'acceptation identifiés par la littérature anglo-saxonne devenue classique (fiabilité, efficacité, équité, etc.), mais les discussions suscitées permettent de les préciser et d'identifier d'autres indicateurs.
Ce travail permet de saisir que pour ceux pour qui la vitesse ne constitue pas, ou pas seule, un problème, le CSA n'offre pas de solution pertinente au problème de la sécurité routière. Le déni de la vitesse comme facteur d'accident est encore bien présent dans les groupes, y compris chez les policiers de la route. De plus, l'automatisation ne constitue qu'un instrument parmi tous ceux dont disposent les pouvoirs publics pour améliorer la sécurité routière et, parmi ceux-ci, les interviewés valorisent surtout les outils éducatifs. Enfin, les perceptions du dispositif sont nourries à la fois par les expériences quotidiennes des interviewés et leur lecture ou écoute des médias.
Mais, le résultat le plus original est que cet instrument est perçu comme déstabilisant pour les pratiques et les identités des professionnels qui en assurent le bon fonctionnement et donc l'efficacité. C'est ce phénomène qui module le plus fortement l'acceptation des dispositifs déployés et l'acceptabilité des nouveaux usages envisagés pour les deux groupes de professionnels étudiés.

Références

- Beauvois, J.L. et Joule, R.V. (1981*), «* Soumission et idéologies », Psychosociologie de la rationalisation, PUF, Paris.
- Bourdieu, P. (1972), « L'opinion publique n'existe pas », exposé fait à Noroit en janvier et publié dans *Les temps modernes*, 318, janvier 1973, pp. 1292-1309.
- Boussard, V., Loriol M. et Caroly S. (2006), « Catégorisation des usagers et rhétorique professionnelle. Le cas des policiers sur la voie publique », Sociologie du travail, 48, 209-225.
- Cameron, M., Delaney, A., Diamantopulos, K. et Lough, B. (2003), "Scientific basis for the strategic directions of the safety camera program in Victoria", Monash University, Report N°202.
- Cunegatti, H. et Suaud, C. (2008), « Les associations: quels rôles et quelles influences sur les politiques de sécurité routière en France ? », Rapport de recherche pour le GO3 PREDIT, 129 p.
- Delaney, C., Ward, H. et Cameron, M. (2005), "The history and development of speed camera use. Melbourne", Monash University Accident Research Centre, Report N° 242.
- Duchesne, S., Haegel, F.(2008), L'enquête et ses méthodes: l'entretien collectif, Nathan.
- Eyssartier, C. et Hamelin F. (2009), Acceptabilité sociale, professionnelle et politique de l'automatisation du contrôle des infractions au Code de la Route : enquête en Loire-Atlantique : données préparatoires ;
- Felonneau, M.L. Aigrot, F. et Causse, E. (2006), « Normativité et Sécurité Routière: Analyse psychosociologique des mesures réglementaires en matière de permis de conduire », Rapport final, Convention DSCR/INSERR N° CV 03000072.
- Fontaine, M.D., Schrock, S.D. et Ullman, G. (2002), "Feasibility of Real-Time Remote Speed Enforcement for Work Zones", Transportation Research Record, 1818, 25-31.
- Gilbert C. (2008), « Quand l'acte de conduite se résume à bien se conduire. A propos du cadrage du problème sécurité routière », Réseaux, vol. 26/147, pp. 21-48.
- Hamelin, F. (2007), « Les dimensions politiques de l'acceptabilité du contrôle automatisé de la vitesse », dans L. Carnis et F. Hamelin, Revue de littérature internationale sur le contrôle automatisé de la vitesse, rapport rédigé conformément au volet 1 de la convention de recherche CV05-021 commanditée par la DSCR à l'INRETS, juillet, pp. 13-40.
- Hamelin, F. (2008) (dir.), « Les radars et nous. Regards croisés sur l'acceptation du contrôle automatisé des vitesses par les Français », Paris, L'Harmattan, coll. Logiques sociales.
- Krueger, R.A. et Casey, M.A. (2002). Focus Groups. A practical guide for applied research, 3°édition. London: Sage Publication.
- Mucchielli R. (1996), L'interview de groupe. Connaissance du problème, application pratique, Editions ESF.
- ONISR (2006). Impact du contrôle sanction automatisé sur la sécurité routière (2003-2005).
- Ternier, M. Phelippeau, E., Malibert P. et Vilmart, C. (2003), La politique de sécurité routière : les systèmes locaux de contrôle. Conseil national de l'évaluation, Commissariat général du plan, La Documentation française.
- Wissinger, L. M., Hummer, J. E. and Milazzo, J.S. (1999), "Using focus groups to investigate issues of red light running", Transportation Research Record No 1734, 38-45.

REFLEXIONS SUR L'ACCEPTABILITE JURIDIQUE APPLIQUEE AUX INNOVATIONS DU PROJET SARI/AJISE

Gilles MICHEL
GMConseil
Paris, France

Philippe PIERRE
Université de Rennes1
Rennes, France

Hadi SLIM
Université François Rabelais
Tours, France

Résumé

Dans une société de plus en plus sensible au confort et réfractaire au risque il est tentant d'imaginer qu'innovation et droit ne font pas « bon ménage » : s'interroger sur l'acceptabilité juridique des innovations technologiques est donc indispensable avant leur déploiement. C'est à quoi se sont employés les auteurs dans le Thème AJISE du projet SARI.

La méthode des cas sélectionne un nombre limité de scénarios représentatifs des risques induits par la mise en œuvre des innovations afin de les soumettre à l'appréciation d'un « juge » virtuel au travers du critère d'acceptabilité juridique proposé. Leur analyse permet de mesurer l'adaptation, la pertinence et l'efficacité des solutions technologiques de SARI et d'en apprécier les possibles limites vis-à-vis des questions de responsabilité. De cette analyse ont été déduites des recommandations empiriques pour le déploiement des dispositifs.

Mots-clés: acceptabilité, juridique, méthode des cas, scenarios, responsabilité, risque, déploiement, innovation, assurances, couverture des risques.

Abstract

In an environment where people are more interested in comfort than in risk taking, it is easy to assert that law and innovation do not get along well together. Raising the question of the legal acceptance of such innovation is mandatory before any deployment of innovative technologies. That was the mission of the authors in AJISE a sub project of SARI.

The case study method is especially well suited to study the risk involved through said innovation, using a limited set of scenarios to be appraised by a "virtual" judge. The criterion of legal acceptability proposed in this paper is the reference to measure the adaptation and the efficiency of the proposed solutions vis-à-vis the concept of responsibility.

A set of guidelines has been inferred from this study in order to prevent any exaggerated risk taking by the bodies which will be responsible for managing such innovations.

Keywords: acceptability, legal, method, case study, scenarios, responsibility, risk, deployment, innovation, insurances, insurability.

1. L'information dynamique au service de la sécurité routière

Le projet SARI vise à améliorer la sécurité routière en adoptant comme moyen d'action l'infrastructure dans son interaction avec le conducteur par l'intermédiaire d'une signalétique adaptée que l'on suppose être, principalement et à court terme, des panneaux à messages variables (PMV).

La problématique abordée s'intéresse aux « ruptures » de l'infrastructure, ruptures d'ordre purement physique, un virage se refermant par exemple, environnementales ou météorologiques influant sur l'adhérence ou la visibilité. Ces ruptures, éléments déclenchant d'une situation potentiellement accidentogène, doivent pouvoir être prises en charge par le conducteur que SARI se propose donc d'assister dans ces situations critiques.

Le présent article expose l'approche adoptée, au sein du thème AJISE de SARI, pour analyser l'acceptabilité juridique des innovations ainsi envisagées, sous l'angle du droit de la responsabilité (GM Conseil 2010). Il propose, en conclusion, quelques recommandations destinées aux différents acteurs impliqués.

1.1 Problématique juridique

Dans le cadre de notre étude, les questions juridiques sont liées aux conditions de *déploiement* des solutions et concernent l'identification des freins potentiels à celui-ci en raison de la responsabilité pesant sur les différents acteurs. Nous avons donc identifié les risques qui seraient susceptibles de surgir en conséquence de l'exploitation des solutions innovantes pour les analyser, de manière à proposer des recommandations afin d'en atténuer les effets et de favoriser, en conséquence, le déploiement de ces solutions.

Les questions qui se posent dans un tel contexte sont les suivantes :

- Quels sont les risques associés intrinsèquement aux technologies retenues ?
- Quels sont les risques résultant des modes opératoires envisagés ?
- Comment s'établit la chaîne d'action depuis l'analyse de la situation locale de l'infrastructure jusqu'à la diffusion du message vers le conducteur ?
- Comment s'assurer de sa réception et de sa bonne compréhension par ce dernier ?
- Quels sont les différents intervenants dans cet ensemble et comment sont partagées leurs responsabilités opérationnelles ?

1.2 Délimitation du cadre de réflexion juridique

Les disciplines juridiques sont structurées en diverses branches, non exclusives les unes par rapport aux autres, mais couvrant chacune un aspect déterminé des relations sociales. Une question est toutefois omniprésente car transversale : celle de la responsabilité, qui concerne tant le droit civil (réparation due par une personne privée) que le droit administratif (réparation des dommages consécutifs à l'action administrative) et le droit pénal (réprimer les actions et les omissions troublant l'ordre social)[4].

La question de la responsabilité est, de fait, au cœur de toutes les préoccupations. Plusieurs facteurs expliquent la place ainsi occupée aujourd'hui par le droit de la responsabilité : la tendance procédurière, « à l'américaine », de plus en plus affirmée dans notre société

[4] Dans cette perspective d'indemnisation, la responsabilité pénale qui sanctionne les comportements antisociaux ne relève pas du champ de la présente étude, même si les nouvelles technologies peuvent également être à l'origine d'infractions pénales.

contemporaine ; la relation d'interdépendance avec l'assurance. Ainsi, le fait qu'une personne soit susceptible d'être déclarée responsable par un tribunal, même si elle n'a pas encore été définitivement jugée, permet à la victime de s'adresser à l'assureur de cette personne afin de lui demander réparation. De nombreux litiges sont ainsi réglés entre l'assureur du responsable et la victime en dehors des tribunaux ou avant que le tribunal n'ait rendu sa décision définitive. D'ailleurs dans le domaine des accidents de la circulation, le législateur a mis en place une procédure particulière qui permet dans la majorité des cas de faire l'économie de la saisine d'un juge, la victime étant indemnisée directement et rapidement par l'assureur.

C'est la raison pour laquelle, dans le cadre du thème AJISE, l'accent de l'acceptabilité juridique a été mis sur la question de la responsabilité et, par voie de conséquence, sur les aspects d'assurance.

1.3 L'innovation et le droit

Dans une société de plus en plus sensible au confort et réfractaire au risque, où la croyance en la science triomphante s'estompe peu à peu, n'est-il pas tentant d'imaginer qu'innovation et droit ne font pas « bon ménage » ? Répondre par l'affirmative à cette question était peut-être envisageable dans le passé. De nos jours cependant, la prise en considération de la science juridique est de plus en plus indispensable au déploiement des résultats des recherches technologiques.

Pour notre étude, plusieurs textes sont fondamentaux. En matière de circulation routière et d'accidents, la loi Badinter du 5 juillet 1985 est le texte de référence. Il clarifie les relations et les droits entre les acteurs impliqués dans un accident et ouvre, en particulier, une procédure de dédommagement accéléré des victimes, véritable révolution face aux lenteurs et difficultés antérieures.

La loi du 19 mai 1998 relative à la responsabilité du fait des produits défectueux ne peut être ignorée dans le cadre de mise en œuvre d'innovations. Ce texte pose le principe de la responsabilité des producteurs (au sens large). C'est une responsabilité objective qui peut être invoquée par la victime sans qu'elle ait à établir la preuve d'une faute du producteur, dès lors qu'elle démontre en revanche la défectuosité du produit (C. civ., art. 1386-1). Le concept de défaut est subtil : le terme « défectueux » désigne ici le cas d'un produit qui n'offre pas le degré de *sécurité* auquel *"on"* peut légitimement s'attendre (C. civ., art. 1386-4 al. 1). Il ne vise donc pas le bon ou moins bon fonctionnement, voire l'absence de fonctionnement du produit, mais la sécurité de son utilisation telle que peut notamment l'appréhender un utilisateur courant, cocontractant ou non du producteur.

Le « on » n'est autre que celui que soutiennent les parties à l'instance et qu'apprécie *in fine* le juge saisi, en vertu d'un pouvoir souverain par nature subjectif et partant, source d'une inévitable insécurité juridique pour les industriels concernés, notamment les fabricants et distributeurs de produits innovants.

Le droit autorise-t-il encore l'innovation ?

Le refus de la fatalité est l'une des caractéristiques de la société postindustrielle moderne. Cette caractéristique s'est traduite sur le terrain juridique par des mécanismes mêlant, à des degrés divers, assurance, responsabilité et solidarité. Plus concrètement, l'idée qu'il existe des risques dont il serait injuste de ne pas partager la charge a conduit à une plus grande socialisation des risques en répondant, le plus souvent, à un besoin d'indemnisation rapide de la victime, sans exclure la recherche ultérieure de responsabilité.

Le carcan des règles de droit applicables aux cas d'accidents pourrait limiter ou décourager toute tentative d'innovation en raison des risques juridiques. Mais deux notions, récemment apparues en droit positif, sont susceptibles de tempérer l'objectif d'indemnisation dont le droit contemporain de la responsabilité se fait prioritairement l'écho :

- la notion de risque de développement,
- le principe de précaution.

La notion de risque de développement, codifiée par l'article 1386-11-4° du Code Civil, dispose que le producteur, en principe responsable de plein droit, sera exonéré de sa responsabilité si « l'état des connaissances scientifiques et techniques, au moment où il a mis le produit en circulation, n'a pas permis de déceler l'existence du défaut ». Il s'agit là d'une disposition majeure en faveur de l'innovation. Cet article protège l'industriel et la chaîne de distribution de ses produits, contre toute réclamation impliquant une anomalie qui ne pouvait pas être connue ou décelée lors de la conception et de la distribution du produit.

Le principe de précaution a été introduit dans la législation française par la loi dite Barnier du 2 février 1995 relative à la protection de l'environnement, laquelle dispose que : « L'absence de certitude compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment, ne doit pas retarder l'adoption de mesures effectives et proportionnées visant à prévenir un risque de dommages graves et irréversibles à l'environnement à un coût économiquement acceptable ». Ce principe avait été initialement discuté dans le cadre de procès portant sur la sécurité alimentaire et en matière de droit de la santé. On se souviendra aussi de l'affaire du « sang contaminé » ou du contentieux sur l'amiante. Le principe de précaution, est désormais intégré à la Constitution française (Charte de l'environnement, art. 5, loi constit. n° 2005-105 du 1er mars 2005)[5] et conduit à s'interroger sur l'attitude « appropriée » afin d'éviter de faire courir à autrui un risque exagéré. Cependant, à l'exception du droit de l'environnement, le principe de précaution ne fait pas, jusqu'à présent, l'objet de dispositions spécifiques bien qu'il y soit régulièrement fait référence.

Les diverses approches du principe de précaution

De prime abord, le principe de précaution vise à prendre en compte, afin de les éviter, des risques qui, bien qu'identifiés, dépassent les capacités d'analyse scientifique du moment. Ce principe soulève la question majeure de l'attitude qu'il induit.

Selon une première conception, le principe de précaution répondrait à une exigence de «risque zéro» ce qui impliquerait d'apporter la preuve de l'innocuité d'un produit ou d'une technique, avant son utilisation ou sa commercialisation et, partant, à éviter la mise sur le marché de produits qui présentant des risques hypothétiques ou réels. Si une telle position est favorable au développement de « bonnes pratiques » industrielles, elle est néanmoins susceptible de devenir prétexte à l'inaction et conduire à terme à paralyser toute tentative d'innovation.

Selon une seconde conception, le principe de précaution devrait être considéré comme un principe d'action dans le cadre duquel l'établissement d'un bilan risques/bénéfices d'un produit prend toute son importance : le but n'est pas, alors, d'écarter du marché tout produit présentant un risque, mais seulement ceux qui exposeraient leur utilisateur à un risque excessif eu égard

[5] "Lorsque la réalisation d'un dommage, bien qu'incertaine en l'état des connaissances scientifiques, pourrait affecter de manière grave et irréversible l'environnement, les autorités publiques veillent, par application du principe de précaution et dans leurs domaines d'attributions, à la mise en œuvre de procédures d'évaluation des risques et à l'adoption de mesures provisoires et proportionnées afin de parer à la réalisation du dommage".

au profit que l'on peut en retirer[6]. A l'appui de cette conception, il est possible de relever la transposition la directive européenne relative à la responsabilité du fait des produits défectueux par la loi du 19 mai 1998 qui ne permet de retenir la responsabilité du fabricant qu'à la condition que le produit litigieux ne «présente pas la sécurité à laquelle on peut légitimement s'attendre» ce qui n'implique pas l'absence totale de danger, mais l'absence de danger anormal.

Dans la mesure où cette analyse se combine avec celle pouvant être faite de la notion de risque de développement, cette notion ne peut en effet concerner que les risques indécelables au moment de la mise en circulation du produit. Il reste toutefois à s'interroger sur la méthodologie permettant d'apprécier ce caractère indécelable. Il résulte de la jurisprudence rendue par la Cour de justice des Communautés européennes que le niveau de connaissance scientifique de référence doit s'apprécier non pas par rapport aux connaissances dont le fabricant était subjectivement informé, mais *in abstracto*, et que l'état des connaissances doit s'apprécier au niveau mondial, de simples doutes devant conduire à écarter cette cause d'exonération, dès lors que ces opinions permettaient l'identification d'un risque.

2. De la théorie à la pratique juridique par la méthode des cas

Si le droit, en tant que science, offre un large champ de réflexion théorique, il n'en demeure pas moins que le rôle premier des règles juridiques consiste à fournir des réponses concrètes aux cas d'espèce soumis aux juridictions compétentes. Une fois saisi, le juge est, en effet, tenu de trancher le litige en statuant sur les allégations et les demandes des parties au procès. Pour reproduire cette réalité, la méthodologie adoptée à l'appui de notre réflexion repose sur l'élaboration et l'étude de *cas* représentatifs de situations impliquant les dispositifs SARI et supposant la réalisation de dommages dont l'indemnisation est demandée au juge. La méthode que nous utilisons fait appel aux notions d'acteur, de scénarios et de cas.

*On désigne par le terme « **acteur** » toute personne ou entité susceptible d'être directement ou indirectement impliquée dans une situation à étudier.* Le gestionnaire d'infrastructure ou le conducteur d'un véhicule, par exemple, sont des acteurs selon le sens ainsi retenu.

*Le mot « **scénario** » sert à décrire une suite d'événements se déroulant sur un site équipé de technologies SARI et où un ou plusieurs véhicules circulant en des circonstances accidentogènes du type des « ruptures » envisagées par SARI, participent à un accident.* Un scénario, conformément à cette définition, est en quelque sorte le script qui relate les circonstances précises d'un accident, éventuellement exposées par différents acteurs et sans autre donnée, en raison de l'absence de témoin objectif extérieur.

*Le vocable « **cas** », enfin, est utilisé pour désigner l'exposé d'un scénario. Un "cas" fait ainsi intervenir un ou plusieurs acteur(s) ou est présenté dans la logique et la perspective de l'intervention d'un ou plusieurs acteur(s). Il est conçu de manière à être soumis à la juridiction compétente afin de rechercher les responsabilités ou, à tout le moins, d'obtenir réparation des dommages subis.* Un cas est donc un scénario construit de manière à tenir compte des considérations juridiques, représentant les pièces d'un dossier, destiné à être porté devant la juridiction compétente par une victime, ses ayant droits ou son représentant.

Ces scénarios et les cas qui y sont associés forment une synthèse entre les différentes composantes technologiques, comportementales et humaines, voire structurelles, qui

[6] La question est alors, bien entendu, celle du critère d'appréciation du résultat de l'analyse risques/bénéfices.

contribuent à l'occurrence de la situation que l'on se propose d'examiner du point de vue juridique. Leur traitement par un juge « virtuel » doit permettre de mesurer l'adaptation, la pertinence et l'efficacité des solutions technologiques proposées et d'en apprécier les possibles limites vis-à-vis des questions de responsabilité.

L'expression de cas est donc une formulation des situations de risques en termes synthétiques. Cette formulation, pour être représentative des différents aspects des questions, doit nécessairement être validée par les différents spécialistes des Thèmes du projet SARI.

2.1 Le concept d'acceptabilité juridique

La notion d'acceptabilité juridique est fortement liée aux concepts de risque et de responsabilité et à la façon dont une société les apprécie. On adoptera l'expression de ce concept formulé dans le cadre du projet ARCOS : *« L'acceptabilité juridique est considérée comme acquise dès lors que la diffusion du dispositif innovant ne modifie pas la charge totale de la responsabilité encourue par les différents intervenants (conducteur, constructeurs, équipementiers, vendeurs, exploitants routiers…) et ne réduit pas le droit à indemnisation des victimes tel qu'il résulte de la législation alors en vigueur. »*

Le concept tel qu'il vient d'être exprimé, explicite les deux idées fondamentales suivantes :

- Maintien de l'équilibre en termes de responsabilité que ce soit entre les parties ou entre celles-ci et tout nouvel arrivant proposant un produit innovant ;
- Conservation des avantages acquis par les victimes quelle que soit l'évolution des technologies et la multiplication des acteurs.

2.2 Elaboration des cas à étudier

Le choix des cas à étudier est fondamental car ils doivent refléter des situations pouvant conduire à un incident ou à un accident résultant directement ou indirectement de l'utilisation des technologies SARI. Ils doivent simultanément correspondre à des situations originales, riches juridiquement et en lien avec le caractère innovant des technologies proposées aux usagers de la route.

La vraisemblance des situations a été testée au travers de réunions avec les représentants des Thèmes techniques et des gestionnaires d'infrastructure (Conseil Général des Côtes d'Armor). Chacun des cas met en scène un segment d'infrastructure, son équipement innovant et un ou plusieurs usagers au volant de son ou de leurs véhicules. Sauf hypothèse inverse, on suppose que cet ensemble est caractérisé par des capacités et des performances « normales ». Les scénarios vont alors supposer que, pour un ensemble de raisons concomitantes, certains paramètres, techniques ou comportementaux vont s'écarter de cette norme et conduire à une situation exceptionnelle ayant des conséquences dommageables. La finalité de l'exercice consiste à approcher et, si possible, à apprécier quelle pourrait être, selon le juge, la responsabilité des diverses parties prenantes à un accident routier et quelles seraient les réparations envisageables pour les victimes éventuelles.

3. Etude d'un cas

Il a été postulé que les systèmes innovants sont correctement analysés et conçus, mis au point selon les règles et l'état de l'art au moment de leur développement et qu'ils ont été intensivement et exhaustivement testés dans les limites des connaissances courantes. Cinq cas jugés représentatifs ont été proposés qui regroupent, en fait, plusieurs situations possibles

exprimant un « dysfonctionnement » des systèmes, ce terme regroupant l'ensemble des dispositifs et des personnes impliqués par la suite d'événements conduisant à l'accident.

Dans le présent cadre, il n'est pas envisageable d'examiner l'ensemble des cas et d'exposer, fut-ce de façon synthétique, leurs conclusions. On a donc opté, arbitrairement, en faveur de la présentation de l'énoncé et des conclusions, à l'exclusion du développement de l'analyse pourtant essentiel à la compréhension exhaustive, relatives à un seul cas. Le lecteur est invité à se reporter au rapport final du projet pour accéder à l'ensemble de ce travail.

3.1 Cas trouvant leur source dans la transmission de l'information

Cas : Panne du système d'information (non avertissement de danger)

Enoncé du cas : Un système d'affichage innovant, typiquement un panneau à messages variables (PMV), installé sur une route, émet des messages d'information ou d'alerte correspondant à des événements, en nombre limité, parfaitement identifiés, destinés à prévenir les conducteurs de l'occurrence de "ruptures" de l'infrastructure telles que : virage dangereux, éboulement de terrain, brouillard à n km, carambolage à p km, …

Le système tombe en panne ce qui engendre l'absence, un défaut ou un retard de transmission. Le conducteur n'est donc pas averti de la rupture qui risque de le surprendre.

La panne peut résulter de diverses causes. Il peut s'agir d'une panne provenant d'un événement extérieur telle qu'une coupure prolongée d'électricité, la réalisation d'autres travaux dans le secteur, etc. Il peut s'agir d'une panne due à une défaillance du système ou à un défaut d'entretien. Au défaut d'entretien du système lui-même, peuvent être assimilés les dysfonctionnements liés au défaut d'aménagement de l'environnement direct du panneau, tel que les branches d'arbres ou autres éléments. Le panneau pourrait ainsi se retrouver caché par des branches ou par de la neige, etc.

En raison du défaut d'information le conducteur est victime d'un accident qu'il aurait pu éviter s'il avait été correctement informé. Quels arguments peut-il invoquer à l'appui de sa demande d'indemnisation ? A l'encontre de qui ?

« En conclusion, la condamnation de la collectivité publique (obligation à la dette) à *indemniser l'usager de la voirie qu'est le conducteur victime dépendra des possibilités dont* dispose ladite collectivité de s'exonérer de sa responsabilité pour faute présumée. Face à la panne du système, il lui appartiendra de démontrer qu'un entretien normal du PMV ou de son environnement a été accompli, ou qu'une réaction suffisamment diligente en présence de circonstances telles que celles d'ordre climatique, ou la défaillance du réseau électrique, a été mise en œuvre. L'établissement – souvent difficile - d'un cas de force majeure, à l'exemple du fait de la nature, sera également exonératoire. L'imputation définitive de l'indemnisation (contribution à la dette) pourra s'envisager à la charge du producteur du PMV dans le seul cas de sa défaillance technique, constitutive d'un défaut du produit, sous la réserve de l'opposition par le producteur de contraintes réglementaires exonératoires ou du rôle causal de la collectivité dans la survenance de cette défaillance. »

La richesse de la matière juridique ne permet pas d'avancer des conclusions définitives. L'analyse aboutit généralement à un ensemble de considérations permettant d'entrevoir les directions possibles vers lesquelles sont susceptibles de s'orienter les décisions judiciaires. Toutefois, la variété des cas traités et les différentes perspectives adoptées ont permis de dresser un tableau assez complet des problématiques auxquelles un dysfonctionnement réel ou prétendu des systèmes innovants peut mener.

4. Principales conclusions et recommandations résultant de l'étude

Un ensemble de recommandations est proposé de manière à permettre l'introduction efficace et avec une sécurité juridique optimale, des innovations issues du projet SARI. Quelques idées simples permettent, à court terme, aux acteurs de se prémunir contre les risques juridiques les plus flagrants. A plus long terme, l'idée est de s'appuyer sur le constat des situations réelles, induites par l'introduction des systèmes d'information de bord de voie, afin d'améliorer l'acceptabilité juridique de ces systèmes.

4.1 Axes de progression

Nous considérerons, successivement, le cas des gestionnaires d'infrastructures, celui des installateurs et fabricants des systèmes d'information de bord de voie et l'usager de la route.

Pour le gestionnaire d'infrastructure
Les systèmes d'information de bord de voie du projet SARI sont destinés à être implantés en des lieux où l'infrastructure est ou risque d'être, en situation de rupture. Le risque est ainsi doublement qualifié par son caractère ordinaire, usuel, et amplifié en raison de l'occurrence ou de la présence d'une telle « rupture ». Si les zones d'implantation des PMV, destinés à limiter les risques de circulation, connaissent néanmoins des accidents, les victimes ou leurs représentants, pourraient s'appuyer sur le caractère innovant du système et son impuissance à prévenir l'accident, pour poursuivre le gestionnaire[7].

L'exposition du gestionnaire à la responsabilité juridique peut-être définitive ou provisoire, lorsqu'elle autorise un recours de ce gestionnaire contre un autre acteur tel que le fabricant du PMV ou tel conducteur fautif. Même dans ce second cas, le succès en droit n'est pas garanti et la procédure expose des frais et des délais. En d'autres termes, l'amélioration de l'acceptabilité juridique des PMV pour le gestionnaire dépend aussi d'une réflexion sur le sort des autres responsables potentiels.

Lorsque les gestionnaires des infrastructures sont des personnes publiques, la réduction de leur responsabilité pourrait se faire dans le cadre d'une politique concertée, régulée au niveau étatique. On concevrait mal en effet que l'équipement avancé du territoire d'un département contraste avec ceux, limitrophes, restés à l'écart de tout investissement de cet ordre. Une implantation par trop sectorisée compromettrait de surcroît les standards indispensables à l'évaluation des risques, à l'instar de la « sécurité à laquelle on peut s'attendre » dans la responsabilité du fait des produits défectueux, ou du « conducteur normalement diligent et compétent » dans la responsabilité de l'automobiliste.

Quant à l'assurance des risques spécifiquement imputables aux gestionnaires de l'infrastructure, afin de favoriser une charte contractuelle de bonnes pratiques et à terme une réduction des coûts, sa délivrance pourrait être subordonnée, en tant que condition de la garantie, à la mise en place de procédures de formations spécifiques des agents de la voirie ou de tout autre personnel susceptible d'intervenir sur/autour des PMV.

Enfin, il est probable que les questions probatoires et de « tracking » prendront une importance croissante avec le rôle accru des systèmes d'information de bord de voie qui devront disposer de la capacité à diagnostiquer leur propre fonctionnement et à informer l'usager, comme l'exploitant, de toute anomalie.

[7] Outre les hypothèses classiques du défaut d'entretien normal du PMV, en tant qu'ouvrage de voirie.

Pour le fournisseur du système d'information de bord de voie
La défectuosité du système fourni entraîne l'application de la loi relative à la responsabilité du fait des produits défectueux. Comme précédemment exposé, l'exonération du fournisseur impliquera la démonstration d'un « risque de développement » du produit ou la preuve de l'influence de la réglementation, l'article 1386-11-5° réservant le cas où « le défaut est dû à la conformité du produit avec des règles impératives d'ordre législatif ou réglementaire ». Tel est un des enjeux de l'implication des pouvoirs publics, dont l'intervention normalisatrice – par la mise en œuvre des procédures de normalisation et/ou de certification des PMV, des informations transmises, qu'elles soient d'ordre signalétique ou météorologique... - peut donc diminuer d'autant l'exposition à la responsabilité juridique des fabricants de PMV.

Sans attendre une telle intervention, il peut être suggéré au fournisseur de travailler de façon intime avec le concepteur du système ou de ses composants, s'il en est l'intégrateur. En effet, outre le respect des normes et standards en vigueur, il lui appartient de respecter les « règles de l'art » liées à son activité et de documenter l'ensemble de ses développements afin de pouvoir y recourir en cas de situation contentieuse.

Enfin, des circonstances plus exceptionnelles peuvent conduire à solliciter le concept de risque de développement. A cette fin, la documentation de l'état de l'art, des choix réalisés lors de la conception et de l'industrialisation du produit, et enfin des tests de validation, est essentielle.

Cette perspective est également essentielle à l'assurance de responsabilité, dont l'efficacité est en réalité la condition principale de développement de l'innovation. Afin de favoriser la présence des sociétés d'assurance sur un marché qui ne relève pas, à ce stade, du champ de l'assurance obligatoire, on pourrait concevoir la méconnaissance des différentes règles de certification, de normalisation, comme autant de causes d'exclusion contractuelle licites. L'assurance pourrait ainsi contribuer à un « cercle vertueux ». Toutefois, afin d'étendre encore le potentiel de couverture des risques, face à des technologies nouvelles dont les facteurs accidentogènes sont encore virtuels, il serait opportun d'améliorer la circulation de l'information entre les compagnies d'assurances et les fournisseurs de manière à recenser les facteurs de risques.

Pour le conducteur
En l'état actuel du droit positif, dépendant de la « loi Badinter » du 5 juillet 1985, le conducteur est susceptible de se voir reprocher diverses fautes en lien avec le PMV qui contrarieront son indemnisation, en l'empêchant notamment d'agir avec succès contre le gestionnaire de l'infrastructure ou le fabricant du PMV. Puisque ces fautes – principalement d'inattention – sont en lien direct avec l'accident et ne relèvent pas de pures fautes comportementales, elles lui sont opposables en vertu de l'article 3 al. 1 de la loi du 5 juillet 1985. Une solution serait de faire évoluer substantiellement cette règle, en étendant aux conducteurs le droit à indemnisation affirmé et protégé pour les autres catégories de victimes, piétons cyclistes et passagers transportés, sauf leur faute inexcusable cause exclusive de l'accident ou intentionnelle. La seule implication de leur propre véhicule dans l'accident ouvrirait ainsi un tel droit, indépendamment du rôle du PMV et des éventuelles responsabilités du fabricant et/ou du gestionnaire, lesquels seraient le cas échéant traitées à titre récursoire. Cette modification apparaissant extrêmement lourde techniquement, il est raisonnable de proposer deux axes d'évolution plus limités :

a) Une amélioration de la formation du conducteur
Les exigences théoriques et pratiques requises pour l'obtention du permis de conduire peuvent

inclure la maîtrise intellectuelle des signaux. Les épreuves pratiques pourraient également comporter une mise en situation du conducteur. La modernisation de l'épreuve du code ainsi que celle de l'épreuve de conduite seraient une opportunité à saisir.

b) Une évolution des règles d'assurance

Une généralisation des assurances directes contre les accidents corporels ouvrirait d'intéressantes perspectives. La généralisation de l'assurance personnelle de ce conducteur, permettant de l'indemniser en toutes circonstances (qu'il soit ou non auteur de son propre dommage) inclurait ce type d'hypothèses et contribuerait à l'acceptabilité juridique et sociale du PMV.

4.2 Observations conclusives

Les voies de progrès précédemment suggérées postulent souvent un arbitrage politique, réglementaire et législatif. Relèvent du premier niveau des mesures portant sur l'évolution des clauses de réduction/majoration, celle des conditions de délivrance du permis de conduire ou de la formation des instructeurs, ainsi que la mise en œuvre des procédures de normalisation et/ou de certification des PMV, des informations transmises, qu'elles soient d'ordre signalétique ou météorologique... Ressortent du second plan les modifications de la législation d'assurance, en particulier l'instauration d'une obligation d'assurance directe contre les accidents corporels bénéficiant au conducteur.

Si, à terme immédiat et à court terme, un certain nombre de réponses sont capables de garantir l'acceptabilité du système de bord de voie de SARI, il est clair que ces réponses sont imparfaites. En effet, elles s'appuient sur un état du droit qui n'a pas encore eu l'opportunité d'assimiler les circonstances particulières d'une évolution technologique essentielle.

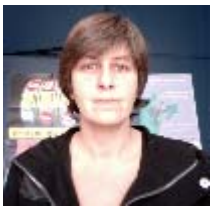
Un certain nombre d'autres initiatives peuvent être identifiées et envisagées pour pallier ce fait. Certaines sont envisageables à relativement court terme sur la seule base de la volonté de parfaire les solutions, d'autres méritent d'autres travaux avant de trouver leur place et leur légitimité. Mais leur exposé déborde du champ de cet article.

Un dernier mot sur le contexte européen. Celui-ci est implicitement mais incomplètement présent dans les considérations évoquées dans notre étude. Il est présent, par exemple, par les références à la jurisprudence de la Cour de Justice de la Commission des Communautés Européennes sur le risque de développement comme sur le droit des victimes. En revanche il n'y a pas de réglementation européenne relative à la faute du conducteur, pas plus en ce qui concerne l'harmonisation de messages de PMV, si ce n'est la Convention de Vienne.
Pour progresser il convient d'abord de procéder à une étude, semblable à celle que nous avons conduite, recouvrant les aspects européens et sans doute quelques autres situations d'intérêt.

Références

- Brun, P., et Pierre, P. (2010), « Répertoire Lamy droit de la responsabilité ».
- GM Conseil (2010), Acceptabilité Juridique, Synthèse et recommandations – Livrable du Thème AJISE du projet SARI.
- Kullmann, J. (2010), « Lamy droit des assurances ».
- Le Tourneau, P. (2009), « Droit de la responsabilité et des contrats ».
- Rapport de la Cour de cassation 2005 (2006), « L'innovation technologique », La Doc. Française.
- Leveneur, L., Lambert-Faivre, Y. (2005), « Droit des assurances », Précis Dalloz.

PRESCRIRE ET PERSONNALISER UN MESSAGE DELIVRE PAR PMV POUR MIEUX INFLUENCER LE COMPORTEMENT DES CONDUCTEURS



F. TERRADE C. GREFFEUILLE A. SOMAT S. BORDEL R. QUEGUINER

LAUREPS Université Rennes 2 France CETE Ouest/LRPC Saint Brieuc France

Résumé

L'acceptabilité individuelle et sociale d'un dispositif d'alerte des usagers d'une difficulté liée à l'état hydrique de la chaussée a été évaluée dans le cadre du projet SARI-IRCAD (Informer des Risques de Rupture de l'Itinéraire en Conditions Atmosphériques Dégradées). Le dispositif était constitué de deux Panneaux à Messages Variables (PMV) se déclenchant en fonction de la hauteur d'eau sur la chaussée et de la vitesse de l'automobiliste. Pour apprécier l'acceptabilité individuelle et sociale de ce dispositif, l'équipe SARI-AJISE (Acceptabilité Juridique, Individuelle, Sociale et Economique) a comparé l'impact du type de message délivré par le PMV sur la vitesse effectivement pratiquée par les usagers de la route. Trois situations, variables quant à la personnalisation d'un message demandant explicitement de ralentir, ont été comparées. Nous supposions que plus le message serait personnalisé (en interpellant plus ou moins explicitement le conducteur) plus il serait efficace quant à la diminution de la vitesse de l'usager. De fait, nous observons que le message impératif « ralentissez » entraîne une diminution de la vitesse plus importante que le message « ralentir ». Nous nous attendons à ce que cette diminution soit encore plus significative par le recours à un message plus personnalisé par l'affichage sur le PMV de la plaque minéralogique du véhicule interpellé. Ces résultats seront discutés en référence à la nécessaire personnalisation des messages persuasifs que l'on sait efficaces au moins dans le domaine de la promotion de la santé.

Mots clés : Panneaux à message variable ; personnalisation ; acceptabilité

Abstract

The individual and social acceptability of a device for alerting users of problems related to water status of the road has been assessed as part of the project SARI-IRCAD (Inform Risk of Rupture of the itinerary Atmospheric conditions Degraded). The device consisted of two Variable Message Signs (VMS) is triggered according to the height of water on the roadway and the speed of the motorist. To assess individual and social acceptability of this device, the AJISE team (Acceptability Legal, Individual, Social and Economic) compared the impact of message type issued by the VMS on the speed actually practiced by users road. Three situations vary as to personalize message asking explicitly to slow down, have been compared. We assumed that personalized message (by calling more or less explicitly the driver) would be more effective in reducing the speed of the user. In fact, we observe that the message "slow" leads to an decrease in speed more important than the message "slow down". We expect that this decrease is even more significant by using a more personalized message by posting on the PMV the number plate of vehicles stopped. These results are discussed with reference to the need for personalize persuasive messages that are known to be effective at least in the field of health promotion.

Keywords : VMS, Acceptability, personalization.

1. Introduction

Dans le cadre du projet d'action concertée SARI (Surveillance Automatisée de l'état des Routes pour l'Information des conducteurs et des gestionnaires) du PREDIT 3, le thème transversal AJISE (Acceptabilités Juridique, Individuelle, Sociale et Economique) avait pour objectif d'étudier les acceptabilités des propositions technologiques développées par les thèmes RADARR, VIZIR et IRCAD. Plusieurs solutions ont été déployées pour informer les usagers des conditions de circulation en temps réel. Cette communication vise à présenter l'évaluation d'une de ces solutions techniques : l'analyse des conditions météorologiques et de la vitesse du véhicule pour informer en temps réels le conducteur du caractère dangereux de sa conduite. Dans le cadre de l'évaluation de ce dispositif, la recherche réalisée a permis de mettre à l'épreuve l'hypothèse selon laquelle la personnalisation des messages délivrés en bord de voie par des Panneaux à Messages Variables (PMV) est un élément déterminant de leur efficacité.

Un message présenté sur PMV doit observer quelques principes de base. Il doit, en premier lieu, respecter les normes européennes (ONU Mars 2005). Mais il faut également qu'il soit perçu, lu et compris par l'usager. En conséquence, un message délivré en bord de voie devra être court (Proffitt & Wade, 1998) et sera donc l'objet d'un traitement rapide (Dudek, 2005). Enfin, outre ces considérations ergonomiques, le message devra convaincre et conduire l'usager à modifier son comportement de conducteur pour l'adapter aux exigences de la situation.

Cette influence d'un message court a été étudiée dans d'autres domaines de prévention comme la promotion pour la santé. Les travaux réalisés dans ce champ d'application montrent que l'influence des messages courts peut être modulées par la façon dont ils sont rédigés (Gustafson, Bosworth, Chewning & Hawkins, 1987 ; Kingsland, 1989 ; Moses, 1990). Un aspect que les auteurs s'accordent à estimer important est celui de la personnalisation des messages. La personnalisation peut prendre différente forme mais a toujours un objectif identique : augmenter le sentiment d'implication des individus. Ainsi, plus l'individu se sentira impliquer par le message qu'on lui présente, plus il y sera sensible et plus on augmentera le pouvoir persuasif du message présenté. Schneider, Schwartz, et Fast (1995) ont, par exemple, montré, dans le domaine de la promotion de la santé, que le fait de personnaliser les messages en les adressant spécifiquement à l'individu concerné permet d'augmenter la motivation de cet individu à adopter un nouveau comportement tout en augmentant dans le même temps sa motivation à respecter les conseils donnés. De plus, les personnes exposées à ces messages personnalisés accordent davantage d'utilité aux conseils délivrés. Ainsi, recourir à un message personnalisé de prévention participe de son efficacité en augmentant non seulement la valeur attribuée à la demande mais également en suscitant chez l'utilisateur une motivation accrue à s'engager dans le comportement prescrit et donc adapté à la situation.

Nous disposons ainsi de plusieurs arguments pour tester dans le domaine de la prévention routière l'efficacité de telles considérations relatives à la personnalisation d'un message délivré en bord de voie. En bord de voie, cette personnalisation du message peut prendre plusieurs formes. On peut envisager d'accroître la personnalisation du message par le recours à des formes de langage plus impératif (ralentissez plutôt que ralentir) ou par une interpellation directe du conducteur par un affichage du numéro de sa plaque d'immatriculation. Les études présentées dans cet article ont eu pour objectif de mettre à l'épreuve ces idées. C'est ainsi, qu'a d'abord été réalisée une enquête destinée à vérifier que

la personnalisation d'un message en bord de voie était bien considérée par les usagers comme un facteur déterminant leur motivation à s'engager dans le comportement prescrit. Puis, nous avons élaboré un protocole expérimental se déroulant en bord de voie pour mettre à l'épreuve notre hypothèse relative à l'efficacité d'un message personnalisé sur le comportement effectif des usagers de la route. Cette étude a consisté à évaluer l'impact de différentes formes de messages, variables quant à leur personnalisation, sur la mise en œuvre effective du comportement prescrit, soit pour la situation qui nous concerne ralentir avant l'entrée dans un virage glissant.

Une première étude menée en laboratoire sur 475 personnes (222 hommes et 253 femmes) nous a permis de recueillir les opinions des individus en ce qui concerne les informations délivrées sur PMV et de vérifier que la personnalisation des messages est bien un facteur déterminant susceptible d'influencer le comportement des conducteurs. De cette étude, nous devons retenir que les usagers estiment que :

- les messages individualisés sont plus efficaces pour l'obtention d'un comportement que les messages impersonnels (ralentir) ;
- les messages impératifs (ralentissez) sont plus efficaces pour l'obtention d'un comportement que les messages évaluatifs (vous roulez trop vite) et que les messages impersonnels (ralentir) ;
- la nature du message (prescriptif/évaluatif, individualisé/neutre) doit être adaptée à la situation dégradée (virage, pluie) dans laquelle on se trouve ;
- les messages devraient être différenciés selon les caractéristiques individuelles des conducteurs ;
- les hommes ont plus l'intention de « ne rien changer » à leur conduite (quel que soit le PMV présenté) que les femmes.

Fort de ces premiers résultats relatifs à l'opinion des usagers, des travaux menés dans le domaine de la promotion pour la santé et des éléments d'analyse bibliographique nous avons élaboré un protocole expérimental se déroulant en trois temps en vue de comparer trois informations comportant plusieurs temps de mesures, avec des messages personnalisés puis individualisés. Ainsi, nous avons étudié d'une part, l'impact de deux messages prescriptifs variant quant à leur intensité ("ralentir" *vs* "ralentissez") et d'autre part, l'impact de l'individualisation du message (affichage de la plaque) sur le comportement routier.

2. Description du dispositif

Les travaux présentés concernent le site d'Etables sur Mer situé entre Binic et St Quay Portrieux (Cotes d'Armor) dans le cadre du thème technique IRCAD. Il s'agit ici d'informer les usagers des difficultés des conditions de circulation en fonction de la vitesse et de la hauteur d'eau sur la route.

Les mesures effectuées sont à deux niveaux : les mesures objectives de vitesse et des mesures subjectives sur la perception, la compréhension du message par les conducteurs et sur le comportement auto-déclaré du respect des messages délivrés par les PMV.

3. Méthodologie

Pour cette recherche, nous disposons de trois temps de mesure pour les vitesses. Un premier point de mesure est situé avant le premier PMV (Alerte généralisée « Rappel »). Un second point de mesure se trouve avant le second PMV (Alerte personnalisée) alors que le troisième a

été placé après le second PMV. Pour les besoins de cette recherche, nous n'avons retenu que les mesures de vitesse issues de la première et de la troisième boucle.

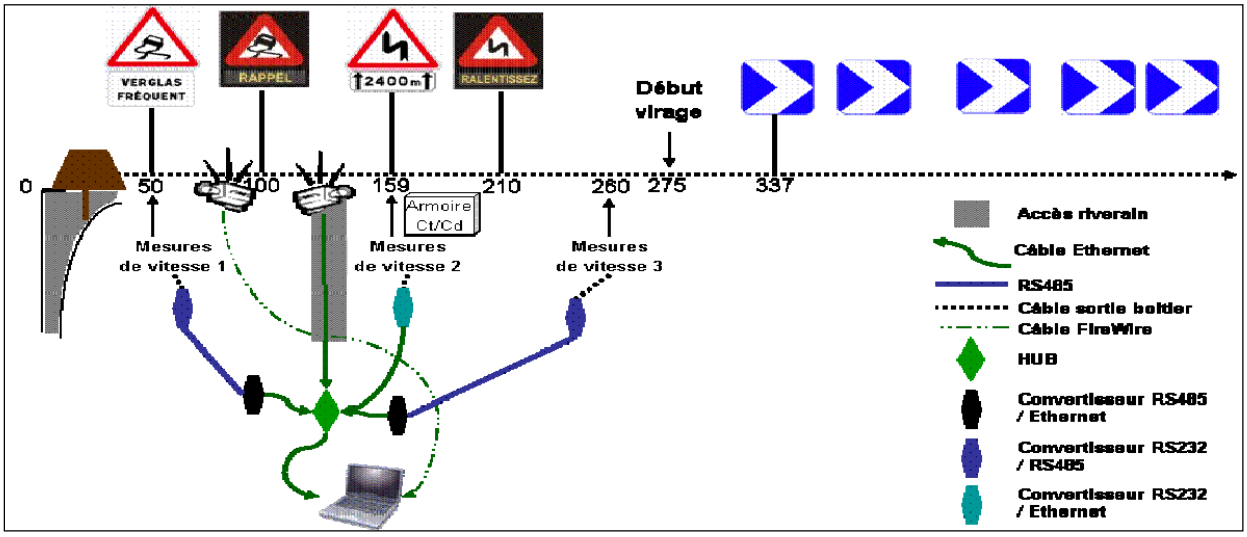


Figure 1 - Schéma du dispositif issu du livrable 1.4 du thème AJISE

Figure 2 - Photo du 1er PMV activé prise sur le site de Binic

Figure 3 - Photo du 2nd PMV activé prise sur le site de Binic

Pour traiter ces vitesses, nous disposons du logiciel Rtmaps qui permet de synchroniser le recueil des données de ces deux points de mesure (boucles magnétiques implantées dans la chaussée, et non visibles par les conducteurs). De plus, deux caméras sont installées sur le site, une qui filme en direction du premier point de mesure (premier PMV) et la seconde qui filme en direction du second PMV et des points de mesure 2 et 3. Ce dispositif permet d'avoir un suivi de vitesse pour chaque véhicule et de pouvoir caractériser son environnement (présence d'un autre véhicule dans le carrefour, ou coupant la voie principale) et de sélectionner les véhicules n'étant pas gênés par une situation particulière (ex : autre véhicule tournant à gauche, etc.). Plusieurs journées de recueil de données ont été nécessaires, avec deux conditions d'enregistrement : condition générale et condition personnalisée. Toutefois, les conditions environnementales restaient identiques pour les conducteurs, à savoir une chaussée mouillée, pluie, et gerbe d'eau.

4. Résultats

4.1 Les mesures objectives

Pour étudier l'impact des différentes alertes, nous avons évalué la différence de vitesses pour chaque véhicule entre les boucles 1 et 3, dans deux conditions : alerte générale et personnalisée. Pour l'ensemble des données recueillies, nous observons un impact significatif des conditions d'alerte sur ces différences de vitesse ($F(1,188)=11,97$; $p=.0007$). Ainsi, l'alerte générale n'entraine aucune diminution de la vitesse (Vit. boucle 1 – Vit. Boucle 3 = 0,84km/h). En revanche, par le recours à une alerte personnalisée (ralentissez) une diminution moyenne des vitesses significative est obtenue (Vit. boucle 1 – Vit. Boucle 3 = -2,95km/h).

Ensuite, nous n'avons retenu dans les données recueillies pour l'alerte générale, que les véhicules roulant à une vitesse égale ou supérieure à 72km/h (seuil minimal de déclenchement du second PMV observé lors de cette expérimentation), afin que les données soient comparables à l'alerte individualisée. La comparaison des différences de vitesses entre la boucle 1 et la boucle 3 sur ces nouvelles données présente des résultats comparables aux précédents. La différence moyenne en alerte personnalisée est de -2,95km/h, alors qu'elle n'est plus que de -0,03 en alerte générale. De manière identique à ce que nous avons observé précédemment une comparaison par analyse de variance nous montre que la différence entre ces différences atteint les seuils habituels de la significativité ($F(1,116) = 9,03$, $p=.003$).

Les résultats recueillis à ce jour nous ont enfin permis de recueillir les données nécessaires à la mise à l'épreuve de l'hypothèse selon laquelle cette différence serait encore accrue par le recours à un message individualisé (affichage de la plaque minéralogique sur PMV). Le dispositif expérimental installé en bord de voie a parfaitement fonctionné et nous disposons d'un ensemble de données concernant 60 véhicules. Malheureusement, ces données obtenues récemment n'ont pas encore fait l'objet d'un traitement statistique. Ne doutons pas que nous disposerons pour la conférence PRAC de l'ensemble des résultats permettant la mise à l'épreuve de notre hypothèse relative à l'influence de la personnalisation.

4.2 Les mesures subjectives

45 usagers (20 femmes et 25 hommes) ont participé à cette nouvelle étude. La moyenne d'âge de cet échantillon est de 54 ans (compris entre 22 et 86 ans, E.T. = 16). Ils possèdent leur permis de conduire depuis 32 ans en moyenne (E.T. =14,9, de 3 à 65 ans). Cette population, relativement âgée, est comparable à celles interrogées lors des expérimentations précédentes.

La majorité des personnes interrogées fréquentent régulièrement le site d'Etables-sur-Mer. Certains usagers passent sur le site plusieurs fois par semaine (25 personnes, soit 56% de l'échantillon) et d'autres tous les jours (5 personnes, soit 11%). 15 personnes interrogées disent fréquenter les lieux moins souvent (soit 33%). Aucune personne ne déclare emprunter cet itinéraire pour la première fois. La population constituant cet échantillon connaît donc le site. Ils sont donc en mesure d'avoir observé des modifications de signalisation (personnalisation du message délivré par le second PMV, avec utilisation de « ralentissez » à la place de « ralentir »).

Les personnes interrogées déclarent rouler en moyenne à 67,78 km/h (E.T. = 10,03, de 50 à 90). Relevons que beaucoup de personnes ont estimé que la vitesse limite sur ce site est fixée à 70km/h alors qu'elle ne l'est en réalité qu'à 90km/h. Cette estimation erronée peut probablement s'expliquer au regard du fait que le site expérimentale est située à moins d'un km d'une zone limitée à 70km/h.

De ces informations subjectives retenons qu'aucune personne interrogée n'est au moment de l'enquête en mesure d'identifier les raisons réelles du déclenchement (hauteur d'eau, et vitesse du conducteur) du second PMV. Les raisons évoquées sont relatives soit à un excès de vitesse soit à des conditions météorologiques dégradées. Ces résultats nous interrogent tout particulièrement puisqu'ils sont obtenus auprès d'une population composée essentiellement d'habitués qui passent sur le site plusieurs fois par semaine. Il faudra en conséquence s'interroger de l'utilité de ces dispositifs installés en bord de voie qui font l'objet d'une incompréhension totale de la part des usagers.

5. Discussion

Les premiers résultats obtenus sont prometteurs et vont dans le sens de nos hypothèses. En effet, les véhicules qui déclenchent l'alerte « Ralentissez » adaptent davantage leur vitesse en fonction du message délivré par le second PMV. On notera que les résultats obtenus par le thème technique IRCAD ne mettaient pas en évidence de différences significatives entre la condition générale et la condition individualisée. Cependant, la méthodologie utilisée n'est pas comparable à celle présentée dans cette étude.

Cette première phase de personnalisation semble donc conforme à nos attentes. Malheureusement, la seconde phase n'a pas encore pu être réalisée dans la mesure où les conditions météorologiques (absence de pluie) ont considérablement retardé le déploiement du deuxième message encore plus personnalisé (Plaque d'immatriculation).

Cependant, une première indication donnée par les mesures subjectives nous conduit à nous interroger sur la compréhension du fonctionnement des panneaux à message variables et sur les messages délivrés. En effet, nos résultats montrent que les conducteurs ne perçoivent pas l'aspect individualisé du message. Pour eux, le message concerne tout le monde et ne leur est pas spécialement destiné. Il semble aussi important de noter que l'absence de message est souvent interprétée comme un dysfonctionnement de la technologie. Il sera donc important à l'avenir de communiquer davantage sur les conditions de fonctionnement des PMV.

Références

- Dudek, C.L. (2005), "White Paper: Impacts of Using Dynamic Features to Display Messages on Changeable Message Signs", Texas Transportation Institute, Texas A&M University System.
- Gustafson, D. H., Bosworth, K., Chewning, B., & Hawkins, R. (1987), "Computer based health promotion", Annual Review of Public Health, 8, 387-415.
- Kingsland, L. C. (Ed.). (1989), Proceedings of the thirteenth annual symposium on computer applications in medical care, Washington DC, IEEE Computer Society Press.
- Moses, S. (1990), "Supermarket computer points out healthy foods", APA Monitor, 21, 10.
- Schneider, S.J., Schwartz, M.D., & Fast, J. (1995), "Computerized, telephone-based health promotion: I.Smoking cessation program", Computers in Human Behavior 11:135-148.
- Somat, A., Terrade, F., & Follenfant, A. (2006), « Résultats du pré-test en fonction de la personnalisation des messages et des différents types de messages », Livrable SARI-AJISE L2.7.1 non publié, Université de Haute-Bretagne, Rennes.
- Violette, E. (2009), « Evaluation de l'impact des systèmes d'information sur les vitesses pratiquées par les usagers », Livrable SARI-IRCAD L4.1 non publié, CETE Normandie Centre, Rouen.

ÉVALUATION DE L'EFFICACITÉ DES SYSTÈMES DE SÉCURITÉ EMBARQUÉS. RÉSULTATS DU PROJET EUROPÉEN TRACE

Adjoint au directeur des Projets Avancés Sécurité – Direction de la Recherche, des Etudes Avancées et des Matériaux

Accidentologiste, spécialiste de sécurité primaire et de reconstruction des accidents

Yves PAGE
RENAULT
Guyancourt, France

Thierry HERMITTE
LAB, PSA
Nanterre, France

Résumé

Les objectifs du projet TRACE (TRaffic Accident Causation Analysis) financé par l'Union Européenne sont la mise à jour des connaissances sur l'étiologie des accidents de la route, ainsi que l'évaluation des bénéfices tirés de prestations de sécurité basées sur les technologies. Les principaux résultats montrent que l'ajout d'une fonction de sécurité du domaine de la sécurité primaire ou secondaire, augmente toujours la sécurité. Par exemple, si toutes les voitures en circulation étaient des véhicules ayant reçu 5 étoiles aux tests EuroNCAP (ancienne formule) et équipés du freinage d'urgence et de l'ESC, comparées à des véhicules 4 étoiles sans ESC ni freinage d'urgence, les accidents corporels seraient réduits de 47%, le nombre de blessés serait réduit de 68% et les accidents graves ou mortels baisseraient de 70%. En ce qui concerne les 19 prestations non encore ou faiblement diffusées sur le marché et étudiées dans le projet, les résultats montrent que les systèmes intelligents d'adaptation de vitesse, les systèmes e-call, les systèmes de 'collision warning' ou de 'collision avoidance' présentent le plus grand potentiel de gains en sécurité. Leur bénéfice attendu se situe entre 6% et 11% de blessés en moins, dans l'hypothèse où le parc automobile en serait équipé à 100 %. Les bénéfices de sécurité des autres systèmes sont le plus souvent en-dessous de 5%. Certains systèmes ont une efficacité potentielle faible (autour de 1%).

Mots-clés: évaluation, aides à la conduite, systèmes de sécurité primaire et secondaire.

Abstract

The objectives of the EU-funded project TRACE (TRaffic Accident Causation in Europe, 2006-2008) are the up-dating of the etiology of road accidents and the assessment of the safety benefits of promising technology-based solutions. The main striking results show that any increment of a passive or active safety function produces additional safety benefits. For example, if all cars were Euro NCAP five stars and fitted with EBA and ESC, compared to four stars without ESC and EBA, injury accidents would be reduced by 47%, all injuries would be mitigated by 68% and severe + fatal injuries by 70%. As for future advanced safety functions, TRACE investigated 19 safety systems. The results show that the greatest additional safety gains potential are expected from intelligent speed adaptation systems, automatic crash notification systems, and collision warning and collision avoidance systems. Their expected benefits (expected reduction in the total number of injured persons if the fleet is 100% equipped) are between 6% and 11%. Safety benefits of other systems are more often below 5%. Some systems have a very low expected safety benefit (around or less than 1%).

Keywords: evaluation, driving aids, safety systems, primary safety, secondary safety.

1. Introduction

Un objectif du projet européen TRACE (TRaffic Accident Causation in Europe, 2006-2008) était d'évaluer l'efficacité des systèmes de sécurité embarqués dans des véhicules légers sur la réduction de la fréquence et de la gravité de divers types d'accidents corporels impliquant des voitures (Page et Hermitte, 2007). Cette évaluation a été conduite selon deux axes :

(1) Estimation des gains sécuritaires de systèmes avant leur introduction sur le marché.
(2) Estimation des gains sécuritaires de systèmes équipant déjà certains véhicules du parc.

2. Méthodes

2.1 Définition des gains sécuritaires

Systèmes de sécurité pas encore introduits sur le marché (première approche) :
- pourcentage d'accidents corporels qui pourraient être évités, et/ou
- pourcentage d'accidents corporels dont la gravité pourrait être réduite, et/ou
- pourcentage d'accidents corporels graves dont la gravité pourrait être réduite, et/ou
- proportion de vies humaines qui pourraient être sauvées

… si 100% du parc automobile européen était équipé de ces systèmes. Cette définition correspond ainsi à une hypothèse d'un accroissement de 0% à 100% du taux d'équipement du parc automobile avec le système de sécurité. Elle suppose aussi que le calcul est réalisé sur le nombre total d'accidents corporels, et pas seulement sur celui des accidents corporels impliquant des voitures.

Finalement, dans les résultats de TRACE, les gains en sécurité se réfèrent tantôt aux accidents corporels, tantôt aux personnes blessés et tantôt aux victimes décédées dans l'accident. Dans la plupart des cas, et souvent parce que les données ne sont pas entièrement disponibles, il n'a pas été possible d'évaluer tous les indicateurs susmentionnés, un ou deux sur quatre seulement étaient calculables.

Pour les systèmes de sécurité déjà disponibles sur le marché :
- pourcentage d'accidents corporels qui pourraient être évités, et/ou
- pourcentage de blessés graves et de tués qui pourraient être épargnés, et/ou
- pourcentage de blessés graves qui pourraient être épargnés, et/ou
- proportion de vies humaines qui pourraient être sauvées

… si 100% du parc automobile européen était équipé de tel ou tel système. Cette définition correspond également à l'hypothèse d'un accroissement de 0% à 100% de l'équipement du parc automobile avec le système de sécurité. Elle suppose aussi que le calcul est réalisé à la fois sur le nombre d'accidents corporels et de blessés visés par le système (par exemple les pertes de contrôle pour les systèmes de contrôle de trajectoire), et sur le nombre d'accidents corporels et de blessés impliquant une voiture.

Pour les systèmes de sécurité non encore introduits sur le marché (deuxième approche) :
Une contribution à l'objectif du projet européen TRACE était de calculer un autre indicateur pour les gains en sécurité : leur capacité à compenser les dysfonctionnements du système de circulation, révélés par les analyses d'accidents. Cette approche complémentaire nécessitait:
- de définir les besoins en sécurité des conducteurs;
- d'évaluer la capacité des systèmes de sécurité à satisfaire ces besoins (approche ex ante) ;
- de définir les contraintes contextuelles qui devraient être prises en compte par ces systèmes, de manière à maximiser leurs gains sécuritaires potentiels.

Les résultats soulignent la relative capacité de ces systèmes à répondre aux besoins du conducteur et à prendre en compte les contraintes contextuelles identifiées lors des accidents étudiés. De plus, ils mettent en lumière les points faibles sur lesquels travailler afin d'améliorer le potentiel de gain en sécurité offert par de tels systèmes.

2.2 Sélection de systèmes de sécurité à évaluer

Nous avons d'abord effectué dans le projet une revue complète des systèmes de sécurité actuels et futurs (Baily, 2007 et Barrios, 2008). Ces systèmes ont été répartis dans les catégories suivantes :

- Sécurité primaire : les systèmes de sécurité actifs sont désormais dénommés primaires. Leur objectif principal est d'améliorer la sécurité du véhicule par de nouvelles technologies, pour prévenir ou éviter l'accident. Le freinage ABS (Anti-Lock Braking Systems), le système d'antipatinage TCS (Traction Control System) ou encore le système de contrôle de stabilité ESC (Electronic Stability Control) sont autant d'exemples de systèmes de sécurité actifs.

- Sécurité secondaire : les systèmes de sécurité passifs sont aujourd'hui appelés secondaires. Ils ont été conçus pour protéger les usagers, notamment les occupants de voiture, et réduire leurs risques lésionnels en cas de crash. L'utilisation d'airbags ou de ceintures en sont les deux exemples les plus communs. Mais il en existe de nombreux autres, le domaine ayant connu des progrès significatifs ces dernières années.

- **Sécurité tertiaire** : la sécurité tertiaire a trait à l'alerte des services de secours lorsque survient un accident, afin de leur fournir des informations pertinentes (lieu, heure, modèle du véhicule, etc.) permettant de réduire significativement le temps de réaction des équipes de secours, augmentant par là-même leur efficacité.

Dans chaque catégorie a été définie une liste des fonctions et systèmes de sécurité, et des technologies employées :

- Fonction de sécurité : il s'agit de la tâche générale d'un système, du service offert à l'usager de la route, par exemple la stabilité du véhicule, l'évitement de collision ou encore l'augmentation de la visibilité du conducteur.

- Système de sécurité : se réfère à un système spécifique qui assure une fonction déterminée. On peut citer la reconnaissance des panneaux de circulation et le déclenchement d'alertes spécifiques, ou l'utilisation de divers Airbags pour la protection des occupants d'un véhicule.

- Technologie : on considère les techniques qui ont rendu possible le développement d'un système déterminé et de son utilisation, comme les technologies radar, amenées à intégrer de nombreux systèmes futurs - évitement d'accident -, ou le contrôleur d'angle mort.

TRACE a établi une longue liste de plus de 160 systèmes de sécurité. Nous avons dû faire une sélection pour évaluer les gains en sécurité d'un nombre raisonnable de systèmes. Dans un premier temps, les systèmes ont été classés selon leur pertinence à une des phases de l'accident (conduite-rupture-urgence-accident), selon leur mode d'aide à la conduite (information-contrôle mutuel-délégation-automatisation), selon leur niveau d'efficacité attendu a priori, et selon la nature des facteurs de risques qu'ils visent (exemple: vitesse excessive). Nous avons tenu à ce que la plupart des modes, des phases ou des facteurs de risques soient couverts. Cette classification nous a aidés à choisir au moins un système dans chaque catégorie. Une matrice a finalement été créée avec les paramètres des quatre critères de sélection, afin que tous les systèmes identifiés puissent être classés et comparés. Nous avons décidé que la liste de systèmes suivante serait évaluée par TRACE (tableau 1).

Tableau 1 - Liste des systèmes de sécurité évalués par TRACE

Cornering Brake Control	Lane Changing Assistant	Tyre Pressure Monitoring and Warning
Brake Assist	Blind Spot Detection	Electronic Stability Program
Predictive Assist Braking	Intelligent Speed Adaptation	Dynamic Suspension
Advanced Adaptive Cruise Control	Traffic Sign Recognition	Advanced Adaptive Front Light System
Collision Warning	Intersection Control	Night Vision
Collision Avoidance	Drowsy Driver Detection System	Rear Light Brake Force Display
Lane Keeping Assistant	Alcolock Keys	Pedestrian Protection Airbag
Advanced Automatic Crash Notification	*Nous conserverons ici les dénominations des systèmes en anglais par souci d'homogénéité puisque certains d'entre eux n'ont pas encore de dénomination précise en français. Nous renvoyons le lecteur aux rapports TRACE pour une bonne compréhension des fonctionnalités de ces systèmes.*	

2.3 Méthodes d'évaluation des gains de sécurité des systèmes non encore introduits sur le marché : les besoins des conducteurs (seconde approche).

L'analyse définit d'abord qualitativement et évalue quantitativement les besoins des conducteurs (Van Elslande, 2008). Elle est basée sur la caractérisation des erreurs humaines fonctionnelles (de perception, de cognition ou d'action) identifiées lors de l'analyse des accidents. La plupart des accidents révèlent une difficulté à laquelle le conducteur n'était pas capable de faire face. Ces difficultés humaines dévoilent, comme un miroir, les besoins du conducteur (par ex. détection du ralentissement du véhicule précédent). Ensuite l'analyse définit les caractéristiques des fonctions de sécurité examinées par le projet TRACE, et évalue leur adéquation aux besoins des conducteurs, c'est-à-dire leur capacité potentielle à répondre aux attentes du conducteur révélées par l'analyse précédente. Cette étude se compose d'une « évaluation *a priori* ou *ex-ante»*, dont le but est d'estimer l'efficacité potentielle de fonctions de sécurité dans l'hypothèse où les véhicules en seraient équipés. (par ex. capacité des systèmes de sécurité à détecter le ralentissement du véhicule de devant).

Une troisième étape explore les restrictions contextuelles potentielles qui pourraient diminuer le fonctionnement optimal des systèmes de sécurité. Ces restrictions sont définies à partir des paramètres caractérisant les contextes dans lesquels des accidents réels ont eu lieu, mettant en lumière quelques contraintes essentielles à prendre en compte afin d'optimiser l'adaptation des systèmes pour augmenter leur efficacité lors des accidents. Ces restrictions couvrent l'ensemble des caractéristiques du conducteur (par ex. un conducteur se retournant pour regarder un passager à l'arrière de la voiture) et de son environnement de conduite (par ex. un trafic chargé ou de mauvaises conditions météo).

Une quatrième étape s'intéresse à l'efficacité de la réponse des fonctions de sécurité, c'est-à-dire leur capacité à remédier aux restrictions contextuelles diagnostiquées à l'étape précédente, et, par conséquent, à en diminuer l'impact potentiel. Une telle analyse permet de définir les manques et les faiblesses de chacune de ces fonctions, et donc de mettre en avant les spécificités sur lesquelles travailler pour en optimiser l'efficacité (par ex. capacité d'un système de sécurité à alarmer un conducteur qui ne regarde pas devant lui).

La dernière étape traite de l'efficacité finale des systèmes de sécurité, c'est-à-dire de leur capacité à compenser les difficultés rencontrées par les conducteurs. Cette efficacité est définie comme la combinaison de l'adaptation des fonctions de sécurité aux besoins, et de

l'efficacité à compenser les restrictions contextuelles dans les accidents. Ces résultats permettent non seulement de définir quels systèmes sont les plus prometteurs en terme de sécurité, mais aussi quels les sont les besoins les mieux couverts par ces systèmes. Cette méthode a été appliquée sur des études détaillées de l'INRETS à partir d'un échantillon d'environ 400 cas d'accidents observés sur le territoire français (Van Elslande, 2008).

2.4 Méthodes pour l'évaluation des gains en sécurité de fonctions de sécurité non existantes : l'approche 'life savings' (première approche).

Plusieurs méthodes ont été appliquées et différentes données d'accidents ou d'exposition au risque ont été utilisées. L'affectation des systèmes de sécurité à différentes méthodes est présentée dans le tableau 2. Ces méthodes sont présentées dans les rapports TRACE de manière exhaustive, ainsi que les raisons nécessitant plusieurs méthodes, et pourquoi, étant donnée la faible efficacité de certains systèmes de sécurité, on présume que les divergences entre méthodes ne perturbent pas la comparaison des résultats.

Tableau 2 - Systèmes de sécurité sélectionnés et méthodes utilisées pour évaluer leurs gains sécuritaires

Systèmes de sécurité	Méthode			
	Méthode "population cible"	Evaluation d'efficacité	HARM	Réseaux de neurones
Tyre Pressure and Monitoring	X			
Lane Keeping Support	X			
Lane Changing Support	X			
Cornering Brake Control	X			
Traffic Sign Recognition	X			
Intersection Control	X			
Intelligent Speed Adaptation		X		
Blind Spot Detection		X		
Alcolock Key			X	
Advanced Automatic Crash Notification			X	
Night Vision			X	
Collision Avoidance				X
Predictive Brake Assist				X
Dynamic Suspension				X
Drowsy Driver Detection System				X
Advanced Front Light System				X
Rear Light Brake Force Display				X
Collision Warning				X
Advanced Adaptive Cruise Control				X

La méthode « population cible » calculant exclusivement le pourcentage d'accidents concernés par la fonction, n'est utilisée que dans les cas où cette population est faible et ne requiert pas de calcul complet d'efficacité.

2.5 Méthodes d'évaluation des gains en sécurité des systèmes déjà sur le marché

La liste des systèmes de sécurité primaire déjà sur le marché et suffisamment diffusés est finalement assez restreinte. Nous avons retenu l'ESC (contrôle électronique de stabilité) et l'EBA (assistant de freinage d'urgence). Quant aux systèmes de sécurité secondaire, très nombreux (éléments de structure automobile, airbags, ceintures, limiteurs de charges, prétensionneurs, etc.), mais très difficiles à évaluer séparément, nous avons décidé de les évaluer dans leur ensemble en considérant le nombre d'étoiles (5 étoiles EuroNCAP contre 4 ou 3 étoiles) obtenus aux tests EuroNCAP..

Notre but était d'évaluer tous les systèmes de sécurité séparément (Zangmeister, 2007). Cependant, étant donné qu'un même véhicule est souvent doté de plusieurs systèmes de sécurité à la fois, nous avons évalué le gain général en sécurité lorsqu'on ajoute un ou deux systèmes de sécurité aux systèmes déjà présents. Par exemple, on peut calculer l'impact d'un ESC et un EBA comparé au fait de n'utiliser aucun de ces systèmes. Ainsi, on peut estimer l'avantage de combiner un système de sécurité active avec un système de sécurité passive.

L'efficacité d'un système de sécurité peut être exprimée par un pourcentage d'accidents corporels évités. Si le système n'est pas capable d'éviter l'accident, il peut cependant diminuer la gravité des blessures d'un occupant ou d'un usager extérieur à la voiture. Dans ce contexte, le gain en sécurité doit être évalué par un pourcentage de réduction des blessés d'un certain niveau de gravité.

Les systèmes que nous étudions sont des systèmes équipant les voitures, donc les gains en sécurité ne sont calculés que pour les accidents corporels dans lesquels sont impliqués une voiture. Ils représentent en France environ 85% des accidents corporels, impliquent une voiture seule, ou percutant un autre usager de la route (piéton, cycliste, deux-roues motorisé, bus, poids-lourd, etc.).

Puisque certaines voitures sont pourvues de plusieurs systèmes de sécurité, la méthodologie utilisée pour évaluer les gains de sécurité d'un groupe de systèmes (dite « configuration de sécurité », SF) est une extension de celle que l'on utilise pour évaluer un seul système. Elle est basée sur la comparaison de deux groupes de véhicules : l'un équipé des systèmes à évaluer, et l'autre non. Les proportions de ces deux ensembles de véhicules, dans les accidents dits 'neutres et 'non neutres', sont présentées au tableau 3. Une situation accidentelle est neutre si les systèmes n'ont a priori pas effet (par ex. l'ESC n'a aucun effet sur les accidents sans mise en cause de la dynamique du véhicule). Une situation accidentelle est non neutre si le système est supposé produire des effets (perte de contrôle, pour l'ESC).

Pour réaliser cette étude au niveau européen sur 25 ou 27 pays, il aurait fallu plus de données pertinentes. Nous avons donc analysé exclusivement les données françaises, en gardant la perspective d'étendre ces résultats à l'échelle européenne. Nous avons utilisé le recensement national français des accidents corporels (fichier BAAC) sur la période 2005-2006. L'étude a porté sur les conducteurs et les passagers avant ceinturés. L'échantillon était composé de 20 076 occupants de véhicules légers.

Tableau 3 - tableau de base pour l'évaluation des gains en sécurité produits par la configuration de sécurité 1 (CS1)

	Type de situation accidentelle	
Véhicule équipé de SF1	Non Neutre	Neutre
Oui	a	b
Non	c	D

L'efficacité est calculée selon l'équation 1:

$$eff(SF1) = 1 - OR = 1 - \frac{\frac{a}{c}}{\frac{b}{d}} = 1 - \frac{a \times d}{c \times b}$$

3. Résultats

3.1 Quelles sont les technologies les plus prometteuses ?

Systèmes non encore introduits sur le marché ou très faiblement répandus

Pour les systèmes non encore sur le marché, l'accroissement de sécurité maximum attendu concerne les systèmes intelligents d'adaptation de vitesse, les systèmes automatiques de notification d'accident, les alertes-collisions et les systèmes d'évitement de collisions (Alexopoulos, 2008). Leur bénéfice attendu se situe entre 6% et 11% de blessés graves en moins. Les bénéfices de sécurité des autres systèmes sont le plus souvent en dessous de 5% (voir tableau 4). Certains systèmes ont une efficacité potentielle faible (autour de 1%).

Tableau 4 - Gains potentiels des systèmes de sécurité

Systèmes de Sécurité	**Efficacité**	
	Vies sauvées (%)	**Blessés graves (%)**
Intelligent Speed Adaptation (**)	17	11
Advanced Automatic Crash Notification (***)	10,8	-
Advanced Adaptive Cruise Control	-	11
Collision Avoidance	-	9,1
Collision Warning	-	6,6
Traffic Sign Recognition (*)	-	5,8
Lane Keeping Assistant (*)	-	5,7
Night Vision	3,5	4,8
Blind Spot Detection (*)	2,5	4
Lane Changing Assistant (*)	-	3,1
Alcolock Key(***)	6	3
Drowsy Driver Detection System	-	2,9
Intersection Control (*)	-	2,3
Cornering Brake Control (*)	-	2,3
Tyre Pressure Monitoring and Warning (*)	-	1,3
Rear Light Brake Force Display	-	0,8
Advanced Adaptive Front Light System	-	0,6
Predictive Assist Braking	-	0,2
Dynamic Suspension	-	0

** Seule la population cible a été calculée*
*** Ces chiffres correspondent à l'évaluation au mode d'ISA le plus efficace : « Driver Select »*
**** Résultats basés sur des données non-européennes (Australie)*
- calcul indisponible

Systèmes déjà sur le marché

Pour ces systèmes commercialisés, les résultats les plus nets sont l'efficacité générale, répartie par niveaux de gravité de blessures (tableau 5). Cette « efficacité générale » correspond au pourcentage de réduction d'accidents corporels et du nombre de blessés que l'on observerait si tous les véhicules étaient équipés du système (comparé à 0% d'équipement).

L'ajout d'un système de sécurité, primaire ou secondaire, conduit toujours à une diminution du nombre de victimes (Page et Cuny, 2008). En général, les gains sont plus importants pour les accidents les plus graves. Par exemple, si toutes les voitures en circulation avaient reçu 5 étoiles aux tests EuroNCAP (ancienne formule) et étaient équipées du freinage d'urgence et de l'ESC, comparées à des véhicules 4 étoiles sans ESC ni freinage d'urgence, les accidents corporels seraient réduits de 47%, le nombre de blessés serait réduit de 68% et les accidents graves ou mortels baisseraient de 70%.

Les résultats sont extrêmement positifs et encourageants, démontrant un grand potentiel pour la généralisation des systèmes de sécurité sélectionnés (tableau 5).

Tableau 5 - Évaluation de l'efficacité des systèmes de sécurité déjà sur le marché

	Réduction du nombre d'accidents corporels (Évitement d'accident)	Réduction du nombre de blessés et de tués	Réduction du nombre de blessés graves et de tués
Efficacité de l'EBA sachant que la voiture est 4 étoiles (Euro NCAP)	-3.2%	7.8%	14.6%
Efficacité de l'ESC sachant que la voiture est 4 étoiles avec EBA.	5.2%	10.3%	16,8%
Efficacité de l'ESC sachant que la voiture est 5 étoiles avec EBA.	3.2%	10.7% (*)	23.4% (*)
Efficacité de la 5ème étoile par rapport à une voiture 4 étoiles et avec EBA	6,4%	8,3%	N.A.
Efficacité de la 5ème étoile comparativement à une voiture 4 étoiles avec EBA et ESC	19.3% (*)	33,8% (*)	35,1% (*)
Efficacité de la combinaison EBA+ESC pour une voiture 4 étoiles.	18,6%	36,3% (*)	42,3%
Efficacité de la 5ème étoile et de l'EBA par rapport à une voiture 4 étoiles.	28,2% (*)	36% (*)	37,5% (*)
Efficacité de la cinquième étoile couplée avec un ESC par rapport à une voiture 4 étoiles avec EBA.	22% (*)	38,6% (*)	37,1% (*)
Efficacité de la cinquième étoile avec ESC et EBA, comparé à une voiture 4 étoiles	47,2% (*)	67,8% (*)	69,5% (*)
Efficacité de la 5ème étoile comparé à une voiture 4 étoiles avec EBA et ESC.	2,1%	N.A.	N.A.

* Statistiquement significatif

L'étude des besoins du conducteur

Le tableau 6 présente l'efficacité des systèmes en terme de couverture des « besoins pivots », révélés lors de la phase de rupture entre la situation de conduite et la situation d'urgence.

Par exemple, la fonction de sécurité *Collision Avoidance* a la capacité de couvrir 137 besoins pivots sur les 432 répertoriés dans les études d'accidents. Ainsi, le *Collision Avoidance* couvre potentiellement 31,6% des besoins pivots des conducteurs. Cependant, ce type de système ne présente une efficacité que dans 44,6% des cas. Par conséquent, l'efficacité totale de sécurité du *Collision Avoidance* n'est plus que de 44,6% * 31,6%, soit 14,1%. En d'autres termes, l'introduction de ce système dans les voitures permettrait d'éviter 14,1% des erreurs humaines qui ont été diagnostiquées comme étant à l'origine du passage d'une situation critique à une situation d'accident.

Globalement, on observe que l'efficacité des systèmes étudiés dans TRACE, lorsqu'ils couvrent un besoin de conducteur pendant la phase de rupture, est de 44,4% en moyenne. Ce résultat représente la capacité globale des systèmes à compenser les contraintes internes et externes caractérisant un contexte d'accident. En d'autres termes, des progrès sont encore à faire en matière de spécifications techniques pour mieux appréhender les paramètres contextuels d'un accident dans des conditions réelles.

Cette efficacité globale doit, de plus, être relativisée par le fait que plusieurs fonctions peuvent couvrir les mêmes besoins (comme le montre le tableau 6, ces fonctions couvrent 156,4% des besoins). C'est pourquoi il est préférable d'examiner cette efficacité fonction par fonction, afin d'obtenir une meilleure estimation de leurs efficacités (Van Elslande, 2008).

Tableau 6 - Capacité des systèmes de sécurité à couvrir les besoins pivots des conducteurs, leur efficacité et efficacité globale (n=432 besoins pivots)

BESOINS Pivots et systèmes de sécurité	Capacité des systèmes à couvrir les besoins 'pivots' (n=432) (A)		Efficacité du système (B)	Efficacité globale (A*B)
	n	%	[10-100%]	(%)
Advanced Adaptive Front Light Systems	0	-	-	-
Advanced Adaptive Cruise Control (+)	21	4.8	75.2	3.6
Advanced Adaptive Cruise Control (1)	8	1.9	82.1	1.6
Advanced Adaptive Cruise Control (2)	15	3.4	51.4	1.7
Advanced Adaptive Cruise Control (3)	0	-	-	-
Alcolock	25	5.7	98.5	5.6
Brake Assist	2	0.5	10.0	0.0
Blind Spot Detection	19	4.3	38.0	1.6
Collision avoidance	137	31.6	44.6	14.1
Cornering Brake Control	6	1.3	53.9	0.7
Collision Warning	114	26.4	33.8	8.9
Drowsiness Detection	28	6.6	42.9	2.8
Dynamic Suspension	2	0.5	27.1	0.1
Electronic Stability Control	36	8.3	54.0	4.5
Intersection Control	125	29.0	42.4	12.3
Intelligent Speed adaptation Informative mode	8	1.9	22.4	0.4
Intelligent Speed adaptation Driver select mode	15	3.5	20.5	0.7
Intelligent Speed adaptation Compulsory mode	18	4.2	39.8	1.7
Lane Change Assist	18	4.2	38.6	1.6
Lane Keeping Assist	21	4.9	42.8	2.1
Night Vision	20	4.6	36.7	1.7
Predictive Assist Braking	2	0.6	15.0	0.1
Rear Light Brake Force Display	7	1.5	16.7	0.3
Vulnerable users protection	28	6.6	47.7	3.1
Traffic Sign Recognition	0	-	-	-

4. Discussion

4.1 Les limites du projet TRACE

On distingue 5 types de limites:

La représentativité des résultats à l'échelle européenne

TRACE a travaillé sur quelques bases de données disponibles auprès de partenaires européens. Même si nous avons cherché des méthodes d' « expansion de données » locales vers des données représentatives pour l'Europe, il n'est pas systématiquement possible d'avoir une vision globale de l'Europe des 25 ou des 27 sur tous les sujets.

La couverture des problèmes
Nous avons identifié environ 160 systèmes de sécurité candidats à l'évaluation. Nous devions faire une sélection, puisque l'évaluation de tous ces systèmes n'était pas possible. Comme nous l'avons expliqué plus haut, pour cette sélection, nous avons suivi des directives que nous nous sommes nous même imposées, afin de ne conserver que les solutions les plus prometteuses, couvrant un nombre important de questions de sécurité.

Pour ce qui est des systèmes non ou faiblement commercialisés, nous avons statué uniquement sur les gains en sécurité des systèmes un par un, sans pouvoir évaluer l'efficacité d'une combinaison de systèmes, comme nous l'avons fait pour les systèmes déjà existants.

Le 'prêt-à-utiliser'
Les techniques d 'évaluation des gains en sécurité sont généralement complexes et uniquement accessibles aux spécialistes. Même si nous avons décrit les méthodes utilisées avec détails, elles ne sont malheureusement pas faciles à appliquer pour des lecteurs non familiers avec l'accidentologie.

En outre, nous n'avons pas développé de logiciel applicable aux bases de données existantes. Les évaluations ont été réalisées au cas par cas.

La multiplicité des méthodes
Le très grand nombre de systèmes que nous avons évalués nécessitait souvent des méthodes spécifiques qui ne pouvaient pas être transposées à d'autres systèmes. Par conséquent, nous nous sommes retrouvés avec plusieurs méthodes applicables et réellement appliquées à des sous-ensembles de systèmes, sans pouvoir recommander une seule méthode générale applicable à tous les systèmes. Ce constat ne peut cependant être considéré comme un point faible du projet. Au contraire, l'existence de ces différentes méthodes montre que les systèmes ont leurs propres spécificités, et que chacun doit donc être analysé soigneusement avec les outils adéquats.

La fiabilité des bases de données
Toutes nos méthodes ont utilisé des données d'accident. Elles se réfèrent parfois à des données obtenues en dehors de TRACE, notamment des données recueillies lors d'expérimentations sur le comportement des conducteurs en situation de conduite ou situation d'urgence. Nos méthodes reposent sur des approches épidémiologiques (pour les technologies déjà commercialisées), ou des approches par simulation (pour celles qui ne sont pas encore sur le marché). Nous n'avons pas réalisé d'études spécifiques sur le comportement des conducteurs, bien que celles-ci pourraient s'avèrer nécessaires pour une évaluation complète de systèmes de sécurité. Des projets en cours, basés sur la mise de œuvre de Field Operational Tests (FOT's), recueilleront et traiteront ce type de données. Elles proposeront certainement, dans un avenir proche, des améliorations ou des compléments aux méthodes d'évaluation des bénéfices sécuritaires des aides à la conduite.

4.2 Quelles sont nos recommandations?

Bases de données sur les accidents
Nous supposions que l'utilisation de données existantes en matière d'accidents pourrait améliorer nos connaissances sur l'étiologie de l'accident et faciliter l'évaluation des gains en sécurité associés aux aides à la conduite. Ce travail est réalisable, mais il requiert des procédures longues et fastidieuses entre partenaires étrangers. Il peut être efficace, mais au prix de nombreux efforts. Par conséquent, nous recommandons d'accélérer l'établissement

d'un système d'information sur la sécurité des routes européennes, lequel recueillerait les données nécessaires, permettrait leur analyse, et les rendrait facilement accessibles. Concrètement, cela suppose :

- Une harmonisation des définitions de variables pour des données macroscopiques d'accidents (de type BAAC), des données détaillées d'accidents et des données d'exposition au risque.

- Le développement d'un système Pan-Européen de codification pour la classification d'accidents. La classification d'accidents est un outil important tant dans la compréhension de la causalité des accidents que dans le fait d'évaluer le potentiel des nouveaux systèmes de sécurité.

- Une harmonisation des systèmes de codification des causes d'accidents.

- Le développement de données européennes d'exposition aux risques d'accident. Une plus grande disponibilité et une plus grande précision dans les données sur l'exposition au risque ouvriraient de nouvelles perspectives à l'analyse des causes d'accidents.

- Un développement supplémentaire de la base de données et de l'interface CARE. Un nombre plus important de pays participants permettrait un contexte européen plus complet, et un nouveau développement de l'interface donnerait plus de flexibilité à l'examen de scénarios spécifiques d'accidents.

Catalogue des applications de sécurité

Nous avons proposé une liste des systèmes de sécurité existants ou en développement. Cette liste est évidemment incomplète puisque de nouvelles technologies et de nouvelles idées de systèmes apparaissent régulièrement sur le marché, ou sont prêtes à être commercialisées. De plus, de nombreuses applications sont en cours de développement dans les départements de recherche des constructeurs automobiles et de leurs fournisseurs, et ne sont donc pas accessibles. Aussi, une telle liste se doit d'être améliorée et actualisée régulièrement, puisqu'elle donne un aperçu des possibilités de ces applications, et permet la sélection des plus prometteuses d'entre elles afin de procéder à leur évaluation.

Analyse de la sensibilité des systèmes de sécurité

Nous avons estimé les gains sécuritaires de technologies non encore commercialisées en se basant principalement sur des données d'accidents et des outils de simulation. La plupart du temps, nous avons évalué des systèmes dits *génériques*, tout en étant dans l'impossibilité de prendre en compte systématiquement la variabilité des paramètres définissant ces systèmes (e.g. seuils de déploiement, type d'IHM, etc.). Nous avons donc très souvent émis des hypothèses sur le fonctionnement réel des systèmes. Aussi, les travaux ultérieurs devront se concentrer sur une analyse de sensibilité permettant d'évaluer les systèmes en optimisant les valeurs des paramètres de leur fonctionnement.

Les applications de sécurité futures

Même si TRACE a conclu que les systèmes de sécurité existants (EuroNCAP 5 étoiles, ESC, EBA) et les systèmes de sécurité en voie de commercialisation (ISA, alerte-collision ou évitement de collision, appel automatique) produisent ou produiraient des gains de sécurité substantiels, cela ne signifie pas que les efforts doivent se concentrer exclusivement sur ces systèmes. Certains systèmes, et particulièrement les fonctions ITS, basées sur la

communication de voiture à voiture ou de voiture à infrastructure, n'étaient pas ou peu étudiés par TRACE. Il est fondamental, dans le futur, d'étudier l'efficacité de ces systèmes, en examinant quels accidents sont concernés par telle ou telle application, et en calculant leur efficacité sécuritaire.

Remerciements

TRACE est un projet du Sixième Programme Cadre financé par la Commission Européenne (DG Infso). Il réunit 21 instituts, associés à part entière ou sous-traitants, de 8 pays différents. La plupart des résultats rapportés ici sont issus des contributions de ces partenaires, qu'il convient ici de remercier pour la qualité de leur travail. Nous remercions également Cécile Derouet qui s'est gracieusement chargée de la traduction d'un article initialement écrit en anglais.

Les données fournies au projet TRACE proviennent de bases de données privées appartenant aux participants, ou de bases de données publiques avec la gracieuse permission d'agences nationales. Les auteurs tiennent à remercier tous ces fournisseurs de données.

Les vues exprimées dans ce rapport appartiennent aux auteurs. Elles ne sont pas nécessairement les mêmes que celles du ministère britannique au transport et aux infrastructures, qui a rendu disponibles les données anglo-saxonnes pour le Vehicle Safety Research Centre à l'université de Loughborough, dans le cadre du projet TRACE.

Références

- Alexopoulos, K. et al. D 4.1.4 (2008), "A priori evaluation of safety functions effectiveness – Results on safety increments", TRACE Report
- Baily, M. et al. D 4.1.1-D 6.2 (2007), "Review of crash effectiveness of Intelligent Transport Systems", TRACE Report
- Barrios et al. D 6.1 (2008), "Common catalogue of existing safety functions and corresponding system platforms", TRACE Report
- Page, Y., Cuny, S. et al. D 4.2.2 (2008), "Evaluation of the safety benefits of existing safety functions", TRACE Report
- Page, Y., Hermitte, T. (2007), "The TRACE Project: an initiative to update accident causation issues and evaluate the safety benefits of technologies", ESV paper 07-0400, ESV Conference, Lyon
- Van Elslande, P. et al. D 4.1.5 (2008), "Assessing drivers' needs and contextual constraints for safety functions: A human-centred approach", TRACE Report
- Zangmeister, T. et al. D 7.4 (2007), "Evaluation and prediction methods for studies on safety functions effectiveness", TRACE Report
- Site internet: www.trace-project.org

RADARR - SYSTEME D'INFORMATION ET D'ALERTE EN VIRAGE : EVALUATION DE L'EFFICACITE DU SYSTEME ET PERSPECTIVE DE SON DEPLOIEMENT OPERATIONNEL

Diplômé de l'Université d'Aix-Marseille en 1988. DEA en Géographie Théorique et Quantitative. Chef de Projets et Responsable du réseau « Sécurité Routière » des agences d'EGIS MOBILITE. Signataire de la Charte Européenne de Sécurité Routière.

Serge POINDEXTRE
EGIS MOBILITE, Agence de Lyon
Lyon, France

Résumé
Le projet RADARR a pour objectif de définir les modalités de mise en œuvre, sur des itinéraires routiers de rase campagne, d'un système d'information alertant les conducteurs d'un risque de perte de contrôle de leur véhicule en virage.
Afin de valider la compréhension et la pertinence du dispositif expérimental par les conducteurs, le système a fait l'objet d'une évaluation par entretiens sur un site pilote. Les résultats montrent que le dispositif impacte favorablement le comportement des usagers, ce qui permet d'envisager des perspectives de déploiement du dispositif sur les routes hexagonales et de donner aux gestionnaires de voiries, les premières modalités méthodologiques et techniques de mise en œuvre.

Mots-clés: Evaluation, signalisation, balisage, virage, enjeux de sécurité routière, conducteurs, alerte, coûts-bénéfices, accidentologie, lisibilité, mise en œuvre, estimation financière.

Abstract
The RADARR project aims to define the modalities of implementing an information system on rural roads that warns drivers of a potential loss of control of their vehicle on a bend. In order to validate the understanding and relevance of the experimental device by drivers, the system has been evaluated on a pilot site via interviews. The results show that the device positively impacts users' behaviour, which give a good prospective for deploying this device on French roads. It also provides road operators with the first methodological and technical processes to implement it.

Keywords: Evaluation, signage, marker posts, bend, road safety issues, drivers, alert, cost-benefit, road accident research, readability, implementation, financial estimate.

1. Evaluation de l'efficacité d'un système d'alerte implanté en virage

1.1 Contexte et objectif de l'évaluation

L'un des axes de recherche du thème RADARR était de définir un système d'information dynamique visant à alerter les conducteurs d'un risque de perte de contrôle en virage. Afin de diffuser une alerte au conducteur au moment approprié, le groupe de travail RADARR a choisi d'étudier l'impact sur la conduite d'un système associant un dispositif dynamique de balisage de virage et un système de mesure et de détection (boucles électromagnétiques).

L'objectif de cet axe de recherche était par l'intermédiaire d'entretiens, d'évaluer l'efficacité, selon le point de vue et le ressenti des conducteurs sur ce système d'alerte implanté en virage.

1.2 Les conditions de l'expérimentation

Le système d'alerte et les scénarios évalués

Le système d'alerte testé dans le cadre du projet RADARR était constitué des éléments de signalisation suivants :

- deux balises de virage à chevrons dénommées (J4) équipées respectivement de deux feux clignotants pilotés par une mesure de vitesse (boucles électromagnétiques),
- un panneau d'avertissement de virage dénommé (A1) signalant un virage à droite,
- des balises de virage dénommées (J1)

Ce système a été implanté dans le virage situé au PR 1+900 sur la RD8 dans le sens Guingamp-Bourbriac, virage identifié comme site accidentogène. Il a été installé progressivement selon 2 scénarios afin de pouvoir évaluer l'impact sur les conducteurs d'une signalisation d'alerte classique puis d'une signalisation d'alerte dynamique individuelle pilotée par une mesure de vitesse.

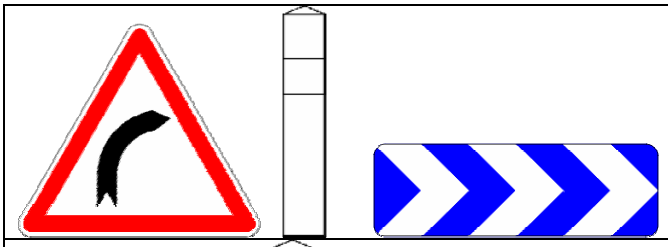
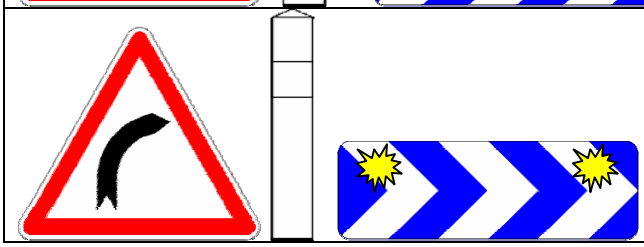
	**Scénario T1 :** Balises J1+Panneau A1+Balises J4
	**Scénario T2 :** Balises J1+Panneau A1+Balises J4 avec feux flash pilotés par des boucles SIREDO

Figure 1 – Les équipements de balisage selon les deux scénarios d'expérimentation

- Le scénario T1 correspondait à la remise à niveau de la signalisation existante de balisage du virage avec la mise en place de 2 balises à chevrons (J4) et d'un panneau d'avertissement du virage (A1),

- Le scénario T2 qui complète le balisage du virage avec l'installation des feux clignotants sur les balises à chevrons (J4) pilotés par des boucles électromagnétiques enregistrant la vitesse de passage 250 m en amont du virage. Le seuil de vitesse au dessus duquel les feux clignotants étaient déclenchés été fixé à 93 km/h,
- La situation de référence (T0) correspond à la signalisation initiale du virage avec seulement des balises de virage de type (J1).

Les expérimentations sur le terrain
La méthode d'évaluation des systèmes testés s'est appuyée sur la technique du recueil des informations via des expérimentateurs. Ainsi pour chaque scénario, les conducteurs ayant négocié le virage test ont été enquêtés par questionnaire directement sur le site. Les expérimentations organisées sur le terrain avaient pour objectif de recueillir deux types de données :

- Des données subjectives recueillies auprès des automobilistes qui ont accepté de répondre au questionnaire d'enquête. Ces données ont permis de recueillir des informations sur le ressenti des automobilistes et sur la manière dont ils ont géré les informations à traiter pendant leur tâche de conduite. Ces données sont traitées comme « du déclaratif », c'est-à-dire qu'il ne faut pas perdre de vue l'écart certain entre ce que les automobilistes déclarent faire dans une situation passé ou projetée et ce qu'ils font réellement.
- Des données objectives recueillies via différents capteurs bord de voie. Au vue des difficultés techniques rencontrées au cours des expérimentations terrain, ces données non disponibles pour le scénario T1 et partielles pour le scénario T2 n'ont pu être malheureusement croisées avec les données et le ressenti des conducteurs (données subjectives).

1.3 Les résultats de l'expérimentation

Dans le cadre du scénario T1 : balisage statique
Un peu plus de la moitié (54%) des usagers interviewés déclarent avoir vu l'évolution de la signalisation par rapport aux semaines précédentes (Scénarios T0). Ces automobilistes ont donc vu un ou plusieurs dispositifs de signalisation implantés (J1, A1, J4). La description de la signalisation perçue renvoie le plus souvent aux balises de virage J4.

Les usagers déclarant avoir vu la signalisation lui associe une fonction d'alerte : elle permet d'avertir d'un virage dangereux et alerte sur la nécessité d'adapter sa vitesse aux caractéristiques géométriques de la route. Pour les conducteurs qui déclarent avoir vu la signalisation, les balises J4 sont considérées comme le dispositif ayant le plus aidé à « adapter leur conduite au profil de la route ».

Dans le cadre du scénario T2 : balisage dynamique
Les balises J4 avec feux flash apparaissent comme étant la signalisation qui a le plus aidé les automobilistes à adapter leur conduite au profil de la route (41% de l'échantillon total), notamment pour les usagers circulant au delà de 93 km/h qui ont déclenché et vu les feux clignotants (58%). Les usagers qui n'ont pas activé les feux flash sont moins unanimes dans leurs préférences : Seulement 37,5% d'entre eux déclarent que ce sont potentiellement les balises J4 avec feux flash qui peuvent le plus aidé à adapter leur conduite au profil de la route, mais ils sont également près de 1/3 à préférer le panneau de pré-signalisation A1 et 1/3 à juger qu'aucune signalisation ne les a aidé à adapter leur conduite au profil de la route. Seulement 4 automobilistes sur les 68 interviewés (5%) ont déclaré avoir compris que l'activation des feux flash était fonction de la vitesse. Le message d'alerte diffusé individuellement par les feux flash n'est donc pas compris par la majorité des usagers.

Comparaison scénario T1/scénario T2 : apport d'une signalisation dynamique individualisée

Les données subjectives issues des expérimentations menées auprès des automobilistes font apparaître la conclusion suivante :

- Plusieurs automobilistes ayant testé la signalisation d'alerte classique déclarent qu'une signalisation lumineuse ou/et clignotante pourrait constituer une solution optimale. Le clignotement étant associé à une alerte.
- Les automobilistes ayant testé la signalisation d'alerte dynamique individuelle l'ont vue mais ne l'ont pas comprise. Du moins, ils n'ont pas compris que l'alerte clignotante leur était adressée en raison de leur vitesse excessive.

Les données objectives de vitesse démontrent une diminution significative de la vitesse des usagers après la mise à niveau de la signalisation, puis après installation de la signalisation dynamique.

Premières pistes de réflexion

La signalisation d'alerte dynamique constitue une solution optimale pour la signalisation de virages dangereux car bien appréciée par les automobilistes. Le choix de l'implantation d'une signalisation d'alerte dynamique en pré-signalisation ou dans le virage est finalement complémentaire :

- Les balises J4 (sans feux clignotants) implantées dans le virage sont bien perçues et comprises par les automobilistes,
- Bien que moins bien perçu (vu) par les usagers, le panneau A1 implanté 150 m en amont du virage est également apprécié par les automobilistes ; il alerte et informe suffisamment tôt l'automobiliste sur les caractéristiques dangereuses du virage.

  Le message d'alerte diffusé par les feux flash n'a pas été compris par les automobilistes. La signalisation d'alerte dynamique individualisée sera d'autant plus efficace si elle est mieux comprise par les usagers. Pour cela, deux pistes sont à envisager :
- Optimiser et enrichir le message d'alerte. Cela passe nécessairement par la mise en place d'un panneau à messages variables.
- Ou, dans le cas où une solution à bas-coût reste privilégiée (type feux clignotant), une action de sensibilisation auprès des automobilistes devra être menée avant toute mise en œuvre sur le réseau routier des systèmes d'alerte identifiés.

2. Le déploiement du système d'alerte

2.1 Une transition entre l'expérimental et l'opérationnel

Le système d'alerte en virage délivre donc des résultats encourageants montrant l'efficacité du système. Des approfondissements et des expérimentations complémentaires apparaissent encore nécessaires à mener à ce stade du programme RADARR notamment dans l'évaluation de l'efficacité des balises J4 mono-chevron, dans la définition d'un niveau de risque pour l'usager en fonction de sa trajectoire dans le virage, ou la mise au point d'outils permettant de diagnostiquer, avec un grand rendement, les ruptures physiques d'un itinéraire.

Cependant, il est apparu possible d'ores et déjà d'ébaucher des pistes de mise en œuvre opérationnelle à l'usage des gestionnaires de voiries, à travers la constitution d'un canevas de guide technique, et d'estimer les coûts et bénéfices attendus d'un tel système d'alerte.

2.2 Analyse coûts-bénéfices

L'hypothèse de travail

Pour appréhender cette analyse socio-économique, l'hypothèse de travail retenue a été la suivante : l'évaluation du dispositif a montré dans l'état actuel des recherches du thème RADARR, une baisse des vitesses de franchissement du virage par les conducteurs, en rappelant que nous n'avons pu aboutir à des résultats sur la problématique relative à la trajectoire des véhicules. L'analyse coûts-bénéfices s'appuie exclusivement sur la donnée « vitesse ».

L'analyse, pour quantifier les avantages de la mise en œuvre du système d'information et d'alerte, a donc été élaborée à partir de l'évaluation des enjeux de sécurité en mesurant la réduction potentielle des accidents dans les virages, liée à la baisse des vitesses pratiquées.

L'évaluation des enjeux de sécurité

La relation directe entre réduction des vitesses et l'accidentologie est communément reconnu comme positive. Ainsi, à partir des différentes publications et rapports de recherches il est admis de manière générale qu'une réduction de 1% de la vitesse moyenne sur des virages en rase campagne, contribue à réduire le taux d'accident de 2% et le taux d'accident mortels de 4%. Cette donnée de départ, bien que générale, à un réel effet positif sur la sécurité pour les virages où les vitesses d'approches et de franchissements sont élevées, ce qui correspond à la grande majorité des virages en rase campagne.

Sur la base d'une réduction des vitesses moyennes de 5% apportée par le système d'information et d'alerte, l'estimation de la réduction du risque attendu a été estimée à :

Vitesse moyenne observée sur 24H → sur le virage	Réduction de 5% →	Réduction des accidents corporels de 10%→	Réduction des accidents mortels de 20%

L'estimation du bénéfice lié au système d'information est appréhendée par des itérations successives à partir d'une donnée d'accidentologie globale pour l'année 2006.

Accidentologie rase campagne 2006 : données globales France	Tués	Accidents corporels	Blessés hospitalisés	Blessés légers	Total Blessés
	3 363	25 323	19 354	16 125	35 479

Figure 2 – Enjeu de l'accidentologie globale rase campagne en France en 2006

Les indicateurs de sécurité pour les virages, montrent qu'environ 40% des tués en France, le sont dans les virages. On estime que ce pourcentage est aussi applicable aux blessés.

Accidentologie estimé en virage pour la rase campagne (40% de l'accidentologie globale)	Tués	Accidents corporels	Blessés hospitalisés	Blessés légers	Total Blessés
	1 345	10 129	7 742	6 450	14 192

Figure 3 – Estimation des enjeux sur les virages

Au regard des enjeux sécurité sur les virages, tous les virages accidentogènes ne sont pas à instrumenter systématiquement et nous avons pris pour hypothèse, assez optimiste,

qu'environ 1 virage sur 5 peut-être potentiellement équipé, et que ce ratio de 20% est appliqué de manière linéaire sur les personnes impliquées dans les accidents.

Ceci nous permet de recaler l'enjeu accidentologie pour les virages susceptibles d'être équipé par le dispositif.

Accidentologie estimé en virage pour la rase campagne pouvant être équipé du dispositif (Hypothèse 20 %)	Tués	Accidents corporels	Blessés hospitalisés	Blessés légers	Total Blessés
	269	2 026	1 548	1 290	2 838

Figure 4 – Enjeu sécurité routière pour les virages susceptibles d'être équipés du système d'alerte

En appliquant l'estimation de la réduction du risque (en %) attendu par la mise en place du système d'information et d'alerte en virage, on estime les gains de sécurité routière selon les chiffres repris dans la figure 5.

Gains estimés d'accidentologie en virage pour la rase campagne	Tués	Accidents corporels	Blessés hospitalisés	Blessés légers	Total Blessés
	54 (-20%)	203 (-10%)	155 (-10%)	129 (-10%)	284 (-10%)

Figure 5 – Gains estimés pour les virages équipés du système d'alerte

L'enjeu, en termes de vies humaines que l'on peut donc potentiellement préserver, a un coût socio-économique, pour la société important, et nous l'avons estimé sur la base des coûts d'insécurité suivants en euros 2000 :

- 1 tué : 1.000.000 €,
- 1 blessé grave : 150.000 €,
- 1 blessé léger : 22.000 €,
- 1 accident corporel : 3.400 €.

Selon cette hypothèse, le bénéfice total de la mise en œuvre du système d'information et d'alerte avec une réduction des vitesses moyennes de 5% serait de l'ordre de plus de 80 millions d'euros 2000.

54 Tués x 1 000 000 euros	=	54 000 000 euros
155 Blessés graves x 150 000 euros	=	23 250 000 euros
129 Blessés légers x 22 000 euros	=	2 838 000 euros
203 accidents corporels x 3 400 euros	=	690 200 euros
Total estimé	=	**80 778 200 euros** (2000)

Figure 6 – Coûts-bénéfices attendus par la mise en place de système d'alerte

Ces bénéfices importants sont à mettre en lien avec le coût unitaire d'un système d'alerte que l'on peut chiffrer à l'unité, par virage, dans une fourchette de l'ordre de 10 à 16.000 €.

Cette approche socio-économique simplifiée, possède certains biais et les chiffres doivent être interprétés avec prudence, mais la tendance est plutôt favorable pour la mise en œuvre du système.

2.3 Vers un guide méthodologique à l'usage des gestionnaires

Structure du futur guide

De par son contexte expérimental, où tous les moyens de diagnostic du risque de perte de contrôle ainsi que certains équipements proposés dans le projet RADARR ne sont pas généralisables, il est encore trop tôt pour formuler des directives et recommandations précises. Ceci étant, nous proposons une ébauche de structure d'un guide méthodologique à l'usage des gestionnaires qui pourra s'articuler autour des chapitres suivants :

- Objectif et description du système
    - Objectif
    - Rupture physique de la route
    - Description générale du système
- L'identification des ruptures physiques du réseau
    - Les caractéristiques géométriques
    - La vitesse
    - Les trajectoires
    - L'accidentologie
    - La connaissance et l'expertise terrain
- Les méthodes de mesures des ruptures physiques
    - Véhicule VANI/Alertinfra
    - Véhicule de diagnostic du risque de perte de contrôle en virage
    - Modèles et abaques des guides techniques
- Les critères d'implantation du système
- Mise en œuvre du système
    - Description
    - Activation
    - Calibrage
    - Coût

Ce guide, en fonction de l'avancement des travaux, reste à rédiger dans le cadre d'une démarche partenariale.

Les principes du dispositif d'alerte

Le dispositif d'information et d'alerte proposé est constitué des éléments de signalisation et de balisage en fonction de la classe du virage à laquelle il appartient conformément au guide technique du SETRA « comment signaliser les virages » de juillet 2002.

Deux classes de virages sont retenues (Figures 7 et 8).

Activation

L'activation du système d'alerte est réalisée à ce jour en fonction de la vitesse pratiquée. Deux technologies permettent l'activation du dispositif que sont les boucles électromagnétiques et un détecteur avec un radar à effet Doppler.

L'utilisation d'une source d'énergie autonome de type solaire permet d'assurer une autonomie des systèmes importante et un coût de mise en œuvre moindre avec un poste « Génie civil » réduit en comparaison d'une alimentation au réseau électrique en rase campagne bien souvent éloignée ou même inexistante, et qui demande alors de gros travaux de génie civil pour le raccordement électrique avec un coût financier élevé. En fonction du niveau de balisage mis en place et de la technologie utilisée, le coût moyen d'un système est compris dans une fourchette de 10 à 16.000 € HT.

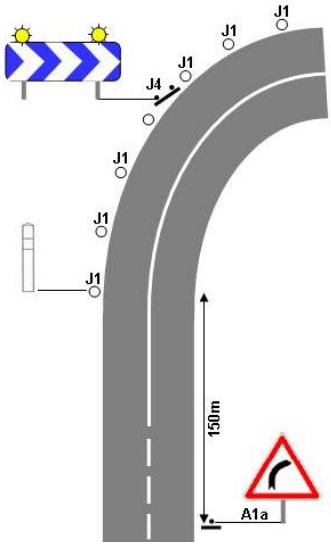


Figure 7 – Virage de classe C avec différentiel de vitesse compris entre 16 km/h et 40 km/h

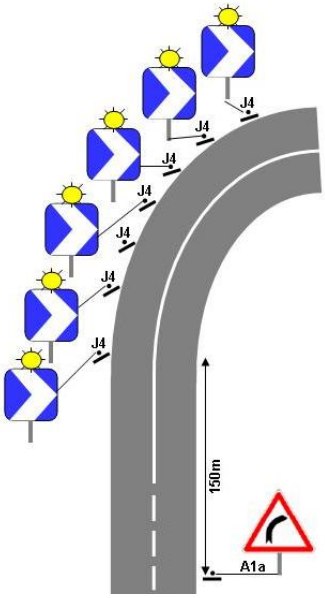


Figure 8 – Virage de classe D avec différentiel de vitesse supérieure à 40 km/h

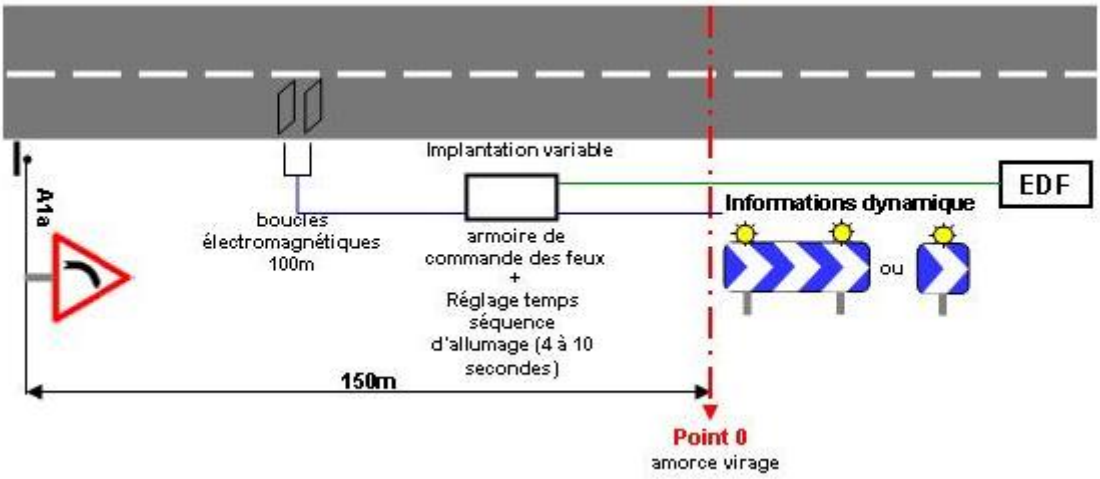


Figure 9 – Schéma d'implantation du système avec boucles électromagnétiques

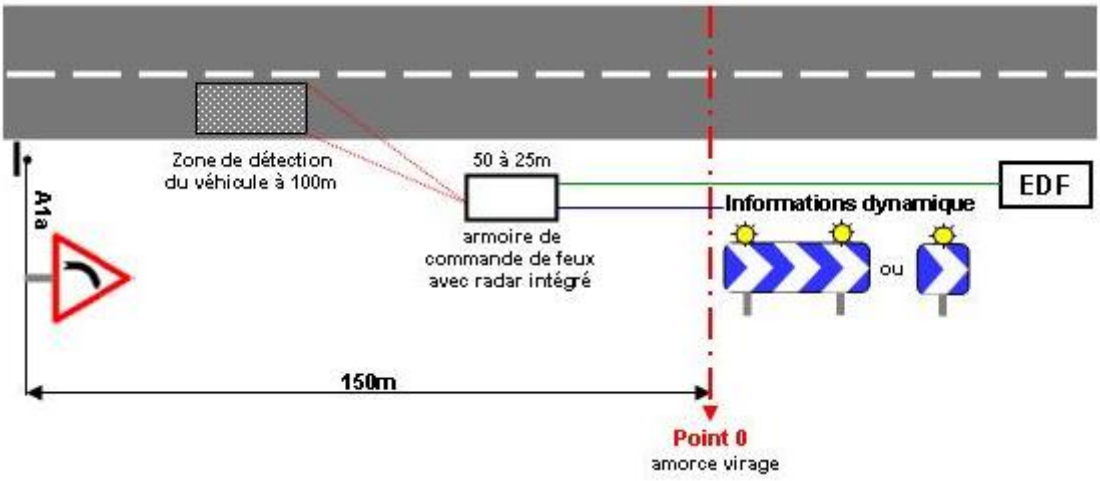


Figure 10 – Schéma d'implantation du système avec radar à effet DOPPLER

3. Perspectives

L'intérêt avéré de la mise en œuvre d'un nouveau système d'alerte ayant pour objectif d'informer plus efficacement les conducteurs (et les gestionnaires) d'un risque élevé de perte de contrôle en virage répond donc à un réel enjeu sécuritaire et socio-économique.

L'ébauche du guide méthodologique, met en place les premiers éléments pour orienter les gestionnaires dans la mise en œuvre et le déploiement de ce dispositif d'alerte sur le réseau routier rase campagne. Il propose des technologies accessibles techniquement et financièrement à ce jour, privilégiant à ce stade de la recherche des systèmes généralisables et à coûts maîtrisés.

Les évolutions prochaines nécessaires dans le cadre du programme RADARR devront porter sur des systèmes d'alerte déclenchées aussi par l'analyse des trajectoires, point sur lequel les progrès à faire restent importants.

L'évaluation des systèmes reste aussi à mener pour en valider l'efficacité en termes sécuritaires et socio-économiques, un recul temporel étant nécessaire après la mise en œuvre pour évaluer l'efficacité du système.

Références

- Caractéristique routières et sécurité – Reconnaissance de la contribution des facteurs route dans la genèse des accidents. Synthèse INRETS n°2, avril 1986.
- Livrable du projet RADARR : 2005-2008 : Projet SARI, PREDIT 3, DSCR.
- Accidents en virages sur routes bidirectionnelles interurbaines – Recherche des caractéristiques géométriques accidentogènes – Modélisation du nombre d'accidents. SETRA, avril 1998
- Aménagement des Routes Principales. SETRA, aout 1994.
- Comment signaler les virages – signalisation verticale – SETRA 2002.
- Instruction Interministérielle sur la signalisation routière, parties 1 à 8. Arrêté du 7Juin 1997.
- Méthode de sélection des virages à signaler et niveau de signalisation à implanter. SETRA 2000.
- Sécurité des Routes et Rues. SETRA, CETUR, septembre 1992.
- Vitesse pratiquées et géométrie de la route. SETRA, 1986.
- Vitesse pratiquées et géométrie de la route. Note d'information Circulation Sécurité Equipement Exploitation n°10. SETRA, avril 1986.
- Détection de configurations à priori accidentogène de l'infrastructure. *Manuel de présentation.* SETRA, LCPC, CETE Lyon, CETE Rouen, septembre 1997.
- Projet DIVAS : Dialogue Infrastructures Véhicules pour Améliorer la Sécurité Routière. Evolution de l'accidentologie au cours des dernières années. Séminaire Décembre 2008. CETE de Lyon.
- Séminaire Caractéristiques routières et sécurité – 17-18 et 19 Mai 2005. LCPC.

ANALYSE DES COMPORTEMENTS EN TERMES DE VITESSE DURANT LE DÉPLOIEMENT D'UN SYSTÈME INNOVANT D'INFORMATION : LA NÉCESSITÉ DE PRENDRE EN COMPTE L'ACCEPTABILITÉ DU DISPOSITIF

S. BORDEL **L. DÉSIRÉ** **O. GUYE** **J. MAILLARD**

CETE de l'Ouest, LRPC St-Brieuc, ERA33 "Comportement de l'Usager et Infrastructure"

Vitec Multimedia

Résumé

L'étude présentée porte sur l'impact, en termes de vitesse, d'un dispositif innovant visant à mieux informer les conducteurs de la voie principale de la présence de véhicules dans le carrefour. Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet SARI – VIZIR. Rappelant le projet et décrivant le dispositif déployé, le présent exposé rapporte enfin l'étude réalisé sur le terrain. Les résultats globaux montrent un effet positif qui cache cependant des disparités voir des effets non attendus. Ces derniers sont discutés au regard de la théorie de la réactance et pose, d'un point de vue opérationnel, la nécessité de prendre en compte l'acceptabilité, non seulement du message lui-même, mais également du fonctionnement du dispositif.

Mots clés : carrefour, visibilité, lisibilité, dispositif innovant, acceptabilité

Abstract

This study examines the effect of an intersection warning systems on drivers' speed behaviour. The systems was implemented on a two-way stop controlled intersection with a restricted sight distance. Image analysis was used to detect the presence of vehicles on the secondary road. In the presence of a vehicle, a Variable Message Sign (VMS) advices the drivers of the major road to pay attention to the oncoming hazardous intersection, no matter their approaching speed. A general positive effect on driver' speed behaviour was observed. Nevertheless, the effect varies depending on the period of the day. These results are discussed in the context of the reactance theory. Together, these results demonstrate that the acceptability of the message and of the system have to be equally considered.

Keywords: intersection ; sight distance ; intersection warning system ; acceptability

1. Introduction

Le 14 juillet 2002, le Président de la République faisait de "la lutte contre l'insécurité routière" le premier des trois "grands chantiers" de son quinquennat. Conjuguant systématisation de la répression et renforcement de la prévention, les actions entreprises ont permis, pour la première fois en 2005, de passer sous la barre symbolique des 5000 morts. Si la diminution du nombre de tués a été importante entre 2002 et 2005 (puisque l'on est passé de plus de 7000 morts à moins de 5000), la progression semble stagner (4275 morts en 2008, 4262 en 2009 ; chiffres ONISR) et le nouvel objectif fixé de "moins de 3000 morts sur les routes d'ici 2012" devra sans doute nécessiter de nouvelles actions. En ce sens, le projet SARI (Surveillance Automatisée de l'état des Routes pour l'Information des conducteurs et des gestionnaires) ouvre une nouvelle perspective.

Action concertée du PREDIT 3 (Programme de Recherches, d'Expérimentations et d'Innovations dans les Transports terrestres), ce projet s'inscrit dans le cadre de la sécurité des routes de "rase campagne". Les accidents de la route en "rase campagne" ont représenté environ 4000 morts en 2004, soit plus de 70% du nombre total des tués, et le risque d'accident mortel sur ce type de route est quatre à six fois plus élevé que sur autoroute (Algarra, 2006). Dans ce contexte, le projet SARI a pour ambition de contribuer à réduire les accidents liés à des sorties de routes ou pertes de contrôle de véhicule en informant mieux les conducteurs des difficultés de conduite rencontrées. SARI développe ainsi trois thèmes techniques concernant 1) les ruptures physiques de la route (thème RADARR), 2) les dégradations apportées par la pluie et le vent (thème IRCAD) et 3) les ruptures de visibilité et de lisibilité de la route (thème VIZIR). Un quatrième thème, AJISE, a pour objectif d'étudier les Acceptabilités Juridique, Individuelle, Sociale et Economique des solutions techniques envisagées.

L'objectif du thème VIZIR est "d'apporter des éléments pour le diagnostic des ruptures de visibilité et de lisibilité routières et de proposer des solutions curatives opérationnelles validées par des expérimentations sur site" (Bremond, 2009). VIZIR s'est intéressé à trois types de difficultés visuelles : les virages, les sommets de côtes en ligne droite et les carrefours. L'étude présentée ici teste l'une des solutions proposées par le thème pour répondre à la problématique des carrefours de faible visibilité. L'exposé décrit dans un premier temps le dispositif déployé sur site réel, dans un second temps, l'étude d'impact du dispositif sur le comportement des conducteurs en termes de vitesse, puis enfin, discute les résultats parfois paradoxaux, notamment au regard de la théorie de la réactance et à un niveau opérationnel, argumente la nécessité de prendre en compte l'acceptabilité du dispositif (message et fonctionnement).

2. Le dispositif

Le projet de SARI est de développer des systèmes qui permettent d'informer le conducteur d'une difficulté qu'il va rencontrer et qu'il n'est pas en mesure de percevoir ou de voir, tout simplement. Dans le cas des carrefours à faible visibilité, l'idée retenue dans VIZIR est d'implanter un dispositif innovant permettant de prévenir en amont du carrefour, via un PMV (panneau à message variable), l'automobiliste de la voie principale de la présence de véhicules au droit de ce carrefour, véhicules pouvant représenter un danger. Ce dispositif a été déployé sur site réel en partenariat avec le Conseil Général des Côtes d'Armor et mis en place à Goudelin [au carrefour entre la RD9 (Guingamp-Lanvollon) et la RD67 (Goudelin-Gommenec'h)]. Il s'agit d'un carrefour en croix dont la visibilité est réduite à moins de six secondes de par la présence d'une courbe à droite. La vitesse y est limitée à 90km/h. Ce site a

été retenu pour ses possibilités d'aménagement pour l'expérimentation terrain et les situations accidentogènes qu'il représente (cisaillements, tourne à gauche, difficultés d'insertion dans le flot du trafic). Il constitue une situation prototypique dans laquelle une information pertinente des usagers de la voie principale pourrait réduire les risques d'accident.

Le dispositif, développé par CEA et Vitec Multimedia, est constitué d'un logiciel, de deux caméras "fish eye"et d'un PMV. Les données caméras sont traitées par l'ordinateur qui extrait les véhicules du fond de l'image et qui est capable d'en déterminer la vitesse et la position dans l'image. Ainsi, le dispositif assure la détection, le suivi et la catégorisation des véhicules traversant le carrefour. Lorsqu'une situation dite "dangereuse" est détectée, le PMV est déclenché. Une situation est jugée dangereuse lorsqu'un véhicule est en approche ou à l'aplomb d'un stop sur une des deux voies secondaires ou lorsqu'un véhicule est sur le "tourne à gauche" de la voie centrale commune aux deux voies principales. Les deux caméras sont placées au sud et au nord du carrefour et filment simultanément et en continu la zone jugée dangereuse du carrefour. Lorsque le PMV n'est pas en service, le panneau est complètement éteint. Lorsqu'il est en service, le panneau peut afficher soit une étoile lorsqu'aucun danger n'a été détecté sur le carrefour, soit un message particulier lorsqu'une situation dangereuse a été enregistrée. Après divers essais, il a été choisi de maintenir le panneau allumé six secondes de plus après la disparition de la détection d'un danger. Cette durée de maintien correspond au temps moyen d'arrivée du véhicule dans le carrefour et à la durée moyenne d'insertion d'un véhicule dans le flot de circulation.

Le choix final du message délivré par le PMV revenait au gestionnaire, à savoir le Conseil Général des Côtes d'Armor. Afin de lui donner des informations utiles et nécessaires à cette prise de décision, plusieurs études ont été réalisées : étude sur simulateur réalisée par l'INRETS-MSIS, l'INRETS-LESCOT et le LAMIH (Université de Valenciennes), étude en laboratoire réalisée par le LAUREPS-CRPCC (Université de Rennes 2). Compte tenu des résultats de ces études (ambiguïté du pictogramme AB2 – annonce d'une intersection avec une route dont les usagers doivent céder le passage – qui semble davantage mettre en avant le caractère prioritaire de l'intersection), compte tenu d'observations relevées par Vitec Multimedia (augmentation des vitesses lors d'un pré-test avec le pictogramme AB2), compte tenu d'aspects techniques (PMV "full matrice" mais avec une ligne de huit caractères pour le message et des hauteurs limités en taille de caractères pour le corps central du PMV), compte tenu des aspects réglementaires d'une part (utilisation d'un pictogramme existant), et des impératifs de gestion (responsabilité du Conseil Général) d'autre part, le message retenu dans un premier temps, à savoir le pictogramme AB2 associé à la mention "ATTENTION" a finalement été remplacé par le message "carrefour dangereux" (mention fixe) associé à la mention "ATTENTION" (clignotant) (Figure 1).

En effet, il s'est avéré que le pictogramme AB2 venait renforcer le caractère prioritaire de la voie plus que souligner le danger rencontré (Rosey, Auberlet, Brusque & Huvelle, 2008 ; Bordel, Désiré, Guégan, Menguy, Terrade, Somat, Maillard & Guye, 2009). Quant à la mention "ATTENTION", elle a été préférée à "DANGER", le terme "DANGER" ne correspondant pas pour les usagers à la situation d'un véhicule dans le carrefour (Rosey et al., 2008), elle a également été préférée à "RALENTIR", le gestionnaire ne souhaitant pas demander à l'usager de la voie principale de ralentir.

Figure 1 - PMV installé sur le site

3. Etude d'impact du système

L'étude avait pour objectif d'étudier l'impact du dispositif présenté sur le comportement des usagers en termes de vitesse. Plus précisément, il s'agissait d'analyser si le fonctionnement du dispositif amenait les automobilistes à ralentir au droit du carrefour. Afin de disposer des données vitesses appariées à chaque situation, le dispositif VIZIR a été utilisé. Dans un premier temps, un pré-test a été réalisé dans le but de vérifier la fiabilité des vitesses des véhicules cibles (circulant sur la voie principale dans le sens Guingamp-Lanvollon – véhicules concernés par le PMV) estimées via les caméras. La méthodologie retenue consistait à comparer les vitesses estimées via les caméras à deux autres mesures de vitesse : mesure des boucles magnétiques implantées sur le site et mesure d'un navigateur GPS. Les résultats ont montré qu'il n'était pas pertinent d'utiliser les "vitesses caméras" à la place des "vitesses boucles". Néanmoins, il a été possible, en calculant un modèle linéaire, d'estimer la "vitesse boucles" (la vitesse "vraie") à partir des "vitesses caméras" :

$$\text{Vitesse Boucles} = 25{,}60 + 0{,}64 * \text{Vitesse Caméra Nord} \quad (1)$$

Sachant que les vitesses Caméra Nord et les vitesses Caméra Sud sont équivalentes ($t(1{,}66) = 0{,}66$; n.s.), et qu'il n'est pas possible d'apparier de manière automatique les données Caméra Nord et Caméra Sud, et que les données Caméra Nord sont les plus nombreuses, nous avons calculé le modèle linéaire général pour les vitesses de la Caméra Nord.

4. Méthode

4.1 Matériel

Le dispositif utilisé pour recueillir les vitesses était le dispositif VIZIR, à savoir que les vitesses étaient enregistrées via le logiciel et les caméras VIZIR.

4.2 Procédure

Une campagne de test a été mise en place durant environ quatre semaines pendant lesquelles les données vitesses des caméras ont été recueillies. Durant les deux premières semaines les données ont été enregistrées sans que le PMV ne soit en fonctionnement (écran noir), puis les deux semaines suivantes, les données ont été enregistrées avec le PMV en fonctionnement (étoile ou message affiché).

4.3 Mesures

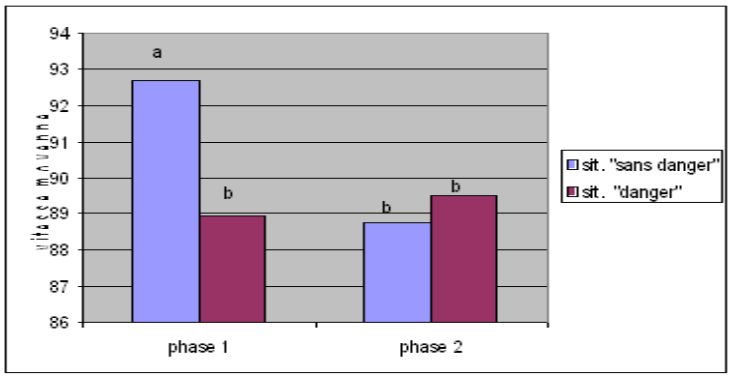
A partir des fichiers bruts (qui capitalisent toutes les détections de tous les véhicules présents dans le carrefour) enregistrés sur le disque du dispositif VIZIR via le logiciel, les données pertinentes ont été sélectionnées (grâce aux logiciels développés par Vitec Multimedia). Elles correspondent :

- aux vitesses des véhicules de la voie principale (sens Guingamp-Lanvollon) ayant dépassé le milieu du carrefour (les véhicules tournant à droite vers Goudelin dont la vitesse est contrainte par la manœuvre ont été exclus) ;
- aux vitesses des véhicules circulant entre 7h et 21h (le dispositif étant prévu pour fonctionner en condition de luminosité diurne, le fonctionnement du PMV est assujetti à des contraintes horaires (7h-21h) déterminées par le lever et le coucher du soleil sur la période) ;
- aux vitesses des véhicules dont le conducteur aurait dû voir le PMV allumé si le système fonctionnait (phase 1) ou a pu voir le PMV allumé (phase 2) pendant au moins deux secondes compte tenu de sa vitesse (estimée par le système) (de cette manière, ont été exclus les véhicules pour lesquels le conducteur a pu voir le PMV s'allumer mais sans pouvoir le lire).

5. Résultats

Les données enregistrées via le dispositif VIZIR n'ont pas été directement analysées : les vitesses Caméra Nord estimées par le logiciel ont été transformées en vitesses "réelles" grâce à l'équation déterminée lors du pré-test. Cette nouvelle variable est notée "vitesse". Par ailleurs, les dysfonctionnements du système ont conduit à ne pas avoir de données pour un certain nombre de journées et pour certaines plages horaires. Par conséquent, afin de comparer des données homogènes, les analyses n'ont été réalisées que sur la plage 13h-21h.

L'analyse de variance réalisée sur les vitesses, avec comme facteurs la phase de l'étude ("phase 1" = PMV éteint ; "phase 2" = PMV en fonctionnement affichant une étoile ou un message d'alerte) et la situation ("danger" = situation dangereuse détectée par le logiciel ; "sans danger" = absence de situation dangereuse détectée par le logiciel) montre un effet principal de la phase ($F(1, 16243) = 38{,}36$; $p < .0001$). En phase 1, la vitesse moyenne est plus élevée ($m = 92{,}39$) qu'en phase 2 ($m = 88{,}87$). Autrement dit, le simple fait que le panneau soit en fonctionnement (affichant une étoile ou le message d'alerte) suffit à observer une diminution des vitesses par rapport à la situation de référence (phase 1). L'analyse montre également un effet principal de la situation ($F(1, 16243) = 29{,}13$; $p < .0001$). En situation "sans danger" la vitesse est plus élevée ($m = 91{,}05$) qu'en situation avec "danger" ($m = 89{,}30$). On note enfin un effet d'interaction *(*$F(1{,}16243 = 67{,}24$; $p < .0001$) entre nos deux variables (Figure 2). Les comparaisons *post hoc* (HSD de Tukey) indiquent une différence significative entre la vitesse moyenne des véhicules lors de la phase 1 en situation "sans danger" comparativement aux trois autres groupes : la vitesse la plus élevée est observée dans la condition "phase1-sans danger" ($m = 92{,}69$) ($m_s = 88{,}96$ / $88{,}74$ / $89{,}50$ pour respectivement les conditions "phase1-danger", "phase2-sans danger" et "phase2-danger"). Autrement dit, en phase 1, c'est-à-dire lorsque le PMV n'est pas en fonctionnement, les usagers roulent plus vite lorsqu'il n'y a pas de situation dangereuse ($m = 92{,}61$) que lorsqu'il y a une situation dangereuse ($m = 88{,}47$). En phase 2, lorsque le PMV est en fonctionnement, il n'y a pas de différence entre les situations (danger/sans danger) et on observe des vitesses équivalentes à celle observée en "phase1-danger". Finalement le fonctionnement du panneau (étoile ou message d'alerte) conduit les automobilistes à conduire à la même vitesse qu'en présence d'une situation dite dangereuse (PMV éteint). On pourra noter par ailleurs qu'il n'y a pas de différence de vitesse entre le message d'alerte et l'étoile.



Note : des lettres différentes indiquent une différence significative à $p < .05$ entre les moyennes d'après les test post hoc HSD de Tuckey.

Figure 2 - Vitesses moyennes pour la plage horaire 13h-21h en fonction de la phase et de la situation

Afin d'affiner ces premiers résultats, des analyses complémentaires ont été réalisées en tenant compte d'une part, de la période de la semaine (jours ouvrés / week-end+jours fériés) et d'autre part, du trafic observé. On observe une forte hétérogénéité des comportements, en termes de vitesse. En ce qui concerne les jours week-end et jours fériés, on note cinq plages de trafic : H'1 (13h00-14h15), H'2 (14h15-15h45), H'3 (15h45-16h45), H'4 (16h45-19h30) et H'5 (19h30-21h00). En H'1, H'2 et H'3, on n'observe pas de différence de vitesse selon la phase et la situation, en H'5 les données ne sont pas suffisantes pour être traitées et en H'4, on observe le même type de résultat que dans l'analyse générale.

En ce qui concerne les jours ouvrés, on observe également cinq plages de trafic : H1 (13h00-15h30), H2 (15h30-16h45), H3 (16h45-17h15), H4 (17h15-18h30) et H5 (18h30-21h00). En H1, en phase 1, les comparaisons *post hoc* indiquent une différence significative entre la situation "sans danger" (m = 92,62) et la situation "danger" (m = 88,05). De la même manière, en phase 2, on observe une différence significative, à p = .06, entre la situation "sans danger" (m = 89,05) et la situation "danger" (m = 91,56), mais la relation est inversée par rapport à la phase 1. En effet, en phase 1 les gens roulent plus vite en situation "sans danger", alors que l'on observe l'inverse en phase 2 : les conducteurs roulent plus vite en situation "danger" qu'en situation "sans danger". Si l'on s'intéresse maintenant à la situation "sans danger", on note une différence significative entre la phase 1 (m = 92,62) et la phase 2 (m = 89,05), les conducteurs roulent plus vite en phase 1. Enfin, en situation "danger", on note une différence significative entre la phase 1 (m = 88,05) et la phase 2 (m = 91,56), mais à l'inverse du résultat précédent, les conducteurs roulent plus vite en situation "danger" (Figure 3).

En H2, phase 1, les comparaisons *post hoc* indiquent une différence significative entre la situation "sans danger" (m = 91,73) et la situation "danger" (m = 88,21). A l'inverse, en phase 2, on n'observe pas de différence significative entre la situation "sans danger" (m = 88,31) et la situation "danger" (m = 89,85). Si l'on s'intéresse maintenant à la situation "sans danger", on note une différence significative entre la phase 1 (m = 91,73) et la phase 2 (m = 88,31) : les conducteurs roulent moins vite en phase 2. Enfin, en situation "danger", on ne note pas de différence significative entre la phase 1 (m = 88,21) et la phase 2 (m = 89,85) (Figure 4).

En H3, phase 1, les comparaisons *post hoc* indiquent une absence de différence significative entre la situation "sans danger" (m = 91,10) et la situation "danger" (m = 90,97). De la même manière, on n'observe pas de différence significative entre la situation "sans danger"

(*m* = 85,50) et la situation "danger" (*m* = 88,49) en phase 2. Si l'on s'intéresse maintenant à la situation "sans danger", on note une différence significative entre la phase 1 (*m* = 91,10) et la phase 2 (*m* = 85,50) : les conducteurs roulent moins vite en phase 2. Enfin, en situation "danger", on ne note pas de différence significative entre la phase 1 (*m* = 90,97) et la phase 2 (*m* = 88,49) (Figure 5).

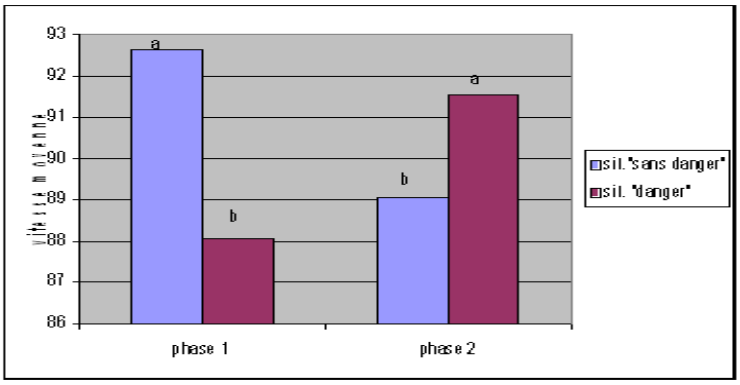


Figure 3 - Vitesses moyennes pour la plage horaire H1 en fonction de la phase et de la situation

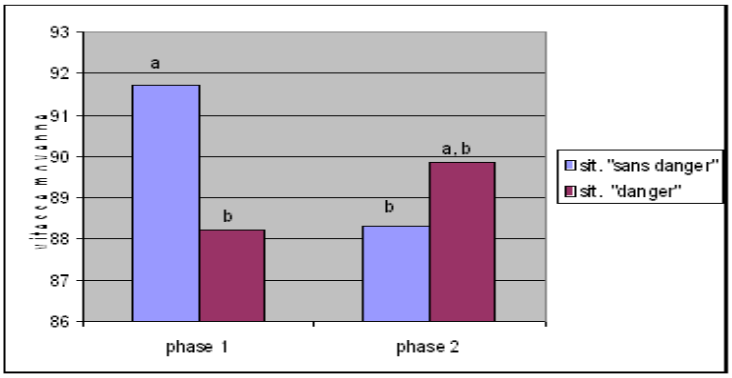


Figure 4 - Vitesses moyennes pour la plage horaire H2 en fonction de la phase et de la situation

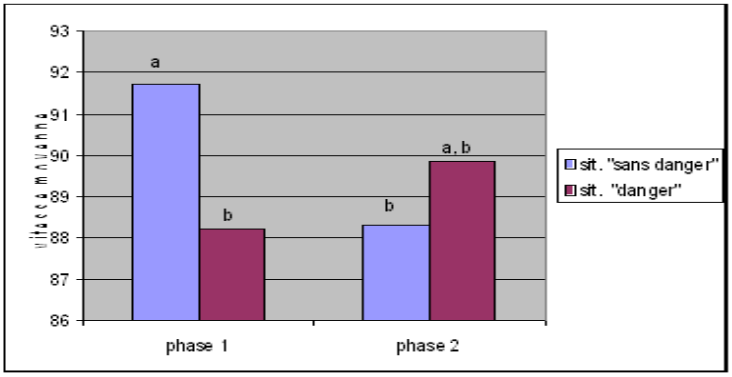


Figure 5 - Vitesses moyennes pour la plage horaire H3 en fonction de la phase et de la situation

En H4, on note le même pattern de résultats qu'en H3 : les comparaisons *post hoc* indiquent, pour la phase 1, une absence de différence significative entre la situation "sans danger" (*m* = 92,43) et la situation "danger" (*m* = 89,28). De la même manière, en phase 2, on n'observe pas de différence significative entre la situation "sans danger" (*m* = 86,51) et la situation "danger" (*m* = 87,93). Si l'on s'intéresse maintenant à la situation "sans danger", on note une différence

significative entre la phase 1 (*m* = 92,43) et la phase 2 (*m* = 86,51) : les conducteurs roulent moins vite en phase 2. Enfin, en situation "danger", on ne note pas de différence significative entre la phase 1 (*m* = 89,28) et la phase 2 (*m* = 87,93) (Figure 6).

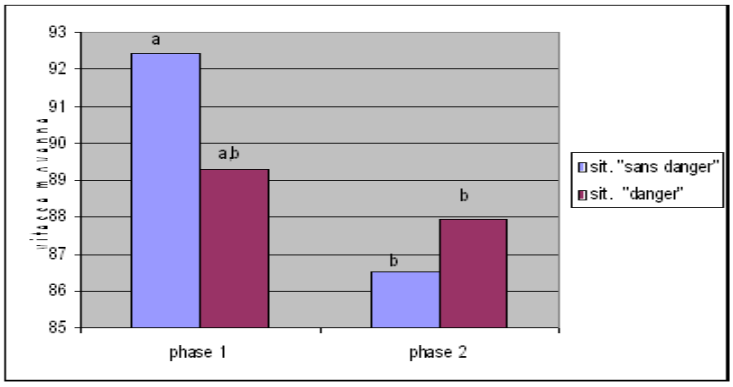


Figure 6 - Vitesses moyennes pour la plage horaire H4 en fonction de la phase et de la situation

En H5, on note le même pattern de résultats qu'en H3 et H4 : les comparaisons *post hoc* indiquent, pour la phase 1, une absence de différence significative entre la situation "sans danger" (*m* = 94,11) et la situation "danger" (*m* = 91,60). De la même manière, en phase 2, on n'observe pas de différence significative entre la situation "sans danger" (*m* = 88,65) et la situation "danger" (*m* = 84,51). Si l'on s'intéresse maintenant à la situation "sans danger", on note une différence significative entre la phase 1 (*m* = 94,11) et la phase 2 (*m* = 88,65) : les conducteurs roulent moins vite en phase 2. Enfin, en situation "danger", on ne note pas de différence significative entre la phase 1 (*m* = 91,60) et la phase 2 (*m* = 84,51) (Figure 7).

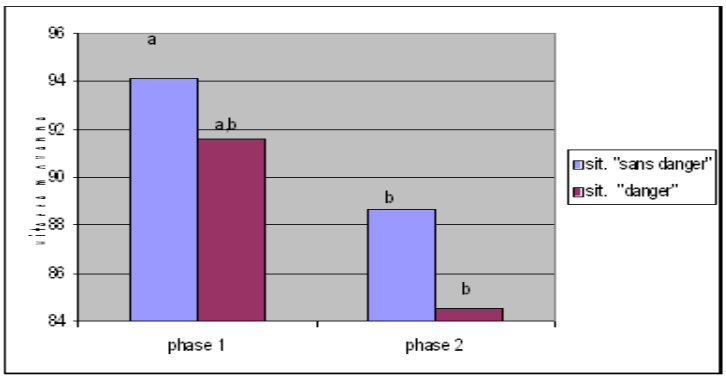


Figure 7 - Vitesses moyennes pour la plage horaire H5 en fonction de la phase et de la situation

6. Discussion

L'étude réalisée avait pour objectif d'étudier l'impact du dispositif VIZIR sur le comportement du conducteur de la voie principale, et ce, en termes de vitesse. L'analyse générale montre un effet d'interaction qui laisse apparaître, en phase 1, qu'en présence d'une situation dangereuse les usagers diminuent leur vitesse par rapport à la situation sans danger. Ce résultat semble indiquer que bien que le carrefour de Goudelin ait été choisi pour son caractère accidentogène (notamment carrefour à moins de six secondes), il laisse malgré tout suffisamment de temps aux conducteurs de la voie principale pour analyser la situation (à savoir situation dangereuse) et pour ralentir en présence d'un véhicule dans le carrefour. En phase 2, on note une diminution des vitesses comparable à celle observée en phase 1 en situation danger, et ce,

qu'il s'agisse de l'étoile ou du message d'alerte. Une conclusion un peu hâtive pourrait conduire à l'idée que puisque cette diminution de vitesse n'est pas plus importante qu'en phase 1, l'apport du panneau n'est pas avéré, cependant, puisque cet effet est observé avec l'étoile (sans présence de danger), on peut supposer que le fonctionnement du panneau amène les conducteurs à se montrer prudent et à diminuer leur vitesse en amont du carrefour et à maintenir cette diminution malgré l'absence de danger en intersection. Par conséquent, on peut faire l'hypothèse que l'allumage du panneau amène les usagers à anticiper un comportement de prudence. On peut faire l'hypothèse que le message d'alerte produit le même effet.

Cependant cet effet positif global du dispositif VIZIR sur le comportement du conducteur cache des disparités. Le résultat le plus marquant à cet égard est celui observé en H1 : on note que les vitesses moyennes observées sont plus élevées en situation "danger" qu'en situation "sans danger". Ainsi en H1, les vitesses moyennes en phase 2 en situation "danger" sont équivalentes aux vitesses moyennes en phase 1 en situation "sans danger". Ce résultat est pour le moins paradoxal. En effet, tout se passe comme si les conducteurs, prévenus par le message d'alerte, n'adaptaient pas leur conduite en diminuant leur vitesse tout en pouvant observer *de visu* une situation dite dangereuse, alors qu'ils l'auraient fait en ne voyant pas le message où en voyant une étoile. Si l'on essaye d'interpréter ce résultat au regard du trafic, on constate qu'à trafic équivalent en H3, on n'a pas le même pattern de résultats. L'hypothèse, qui peut être émise, mais qui demanderait à être approfondie, est qu'il s'agit d'un effet de réactance psychologique (Brehm, 1966). La réactance psychologique a été définie comme la réaction négative des individus à toute tentative de contrainte de leur libre choix. Cette théorie postule que les gens réagissent aux tentatives de contrôle de leur comportement et aux menaces de leur liberté en prenant une position de retrait ou de rejet. Ainsi, l'individu, face à ce qu'il estimerait être une contrainte, adopterait le comportement contraire de celui qui lui est demandé alors que sans ce sentiment, il aurait spontanément produit le comportement attendu. Dans le cas précis qui nous concerne, on voit bien que spontanément, face à une situation dite dangereuse les individus adaptent leur vitesse, mais que face à un message les exhortant à la prudence, ils n'ont plus ce comportement.

Cette interprétation est renforcée par les résultats de l'enquête menée auprès des conducteurs. La majorité d'entre eux à une perception erronée du fonctionnement du dispositif : ils associent l'alerte à leur vitesse et non à la présence d'un véhicule dans le carrefour. Par conséquent cette interprétation erronée peut les conduire à rejeter le message et à y réagir négativement : se sentant contraint par un message qu'ils jugent non pertinent, ils le rejettent et y résistent. Finalement, on voit que la signalisation dynamique met en jeu non seulement la compréhension du message délivré, comme dans le cas de la signalisation classique, mais également la compréhension et l'acceptabilité du fonctionnement du dispositif. Or dans le cas de VIZIR-Carrefour, une meilleure compréhension du fonctionnement du système pourrait conduire à des comportements dangereux (sur-confiance et augmentation de vitesse en l'absence de message). Par ailleurs, on voit également que le fonctionnement actuel pour ne pas dire "habituel" des PMV qui se déclenchent souvent au regard de la vitesse du conducteur conduit à une certaine représentation de ces dispositifs chez les usagers, représentation qui détermine leurs réactions. Dès lors, on peut s'interroger sur l'impact de dispositifs innovants faisant appel à une même technologie PMV mais utilisant un fonctionnement différent. Il est donc souhaitable que la 9ème partie de l'instruction interministérielle sur la signalisation dynamique, actuellement en préparation, puisse prendre en compte ces nouveaux aspects.

Références

- Algarra, L. (2006), « Animation scientifique SARI », Rapport PREDIT-SARI.
- Bordel, S., Désiré, L., Guégan, V., Menguy, G., Terrade, F., Somat, A., Maillard, J & Guye, O. (2009), « Rapport d'expérimentation dur site du système d'information de l'usager sur la présence d'autres usagers. Analyse des résultats. », Rapport PREDIT-SARI, Livrable L2.8.3 bis.
- Brehm, J. W. (1966), "A theory of psychological reactance", Academic Press, New-York.
- Brémond R. (2009), « Rapport final », Rapport PREDIT-SARI.
- Rosey, F., Auberlet, J.M., Brusque, C. & Huvelle, S. (2008), « Compte rendu des études sur simulateur de conduite », Rapport PREDIT-SARI, Livrable 3.2.B.

ANALYSE SPATIALE DES DONNEES LAVIA

Diplômé de l'ENTPE en 2004, ingénieur d'études à la ZELT (Zone Expérimentale et Laboratoire de Trafic)

Sébastien ROMON
ZELT, CETE du Sud-Ouest
Toulouse, France

Résumé
Dans ce papier nous proposons une méthodologie pour l'analyse spatiale des données LAVIA. Nous donnons aussi les premiers résultats de cette analyse sous forme de carte en fin d'article. Nous avons tout d'abord localisé les enregistrements recueillis par le système sur le réseau de voirie en développant un algorithme de map-matching spécifique aux données LAVIA en tenant compte des erreurs de positionnement du système. Nous avons également produit un certain nombre d'indicateurs spatialisés, dont des distributions spatiales des vitesses, qui permettent de mieux analyser et comprendre le comportement de l'usager avec ou sans système d'aide à la conduite, ce que nous ne pouvions pas faire avec une analyse statistique des données.

Mots-clés: Analyse spatiale, système d'aide à la conduite, sécurité routière.

Abstract
In this paper we propose a methodology for analyzing spatial LAVIA data. We also give the first results of this analysis as maps at the end of the article. First, we locate LAVIA data records on the road network by developing a map-matching algorithm for specific LAVIA data, taking into account the positioning errors of the system. Then, we have produced spatialised indicators allowing us to better analyze and understand the behavior of drivers with or without driving assistance system what we couldn't do with a statistical analysis of data.

Keywords: Spatial Analysis**,** Driving Assistance Systems, Road Safety.

1. L'expérimentation LAVIA

Le LAVIA (Ehrlich, 2002) est le projet français d'expérimentation et d'évaluation du limiteur de vitesse s'adaptant à la vitesse autorisée Il s'agit aussi du dispositif testé et implanté dans le véhicule. Le dispositif d'aide à la conduite fonctionne selon plusieurs modes :

- Le mode neutre

Dans le mode neutre, le système délivre aucune information à l'usager. Seul le recueil des données est actif.

- Le mode informatif

Dans le mode informatif, le conducteur est informé à tout instant, par affichage sur le tableau de bord, de la vitesse autorisée à l'endroit où il se trouve. En cas de dépassement de la vitesse de consigne, l'affichage clignote et un voyant s'allume sur le tableau de bord.

- Les modes actifs débrayable et contraint

Dans les modes actifs, le conducteur ne peut dépasser la vitesse réglementaire en vigueur à l'endroit où il se trouve. Pratiquement, cela se traduit par le fait qu'au delà de cette vitesse limite, la pédale d'accélérateur est sans effet car un dispositif électronique limite automatiquement l'injection de carburant. Le conducteur bénéficie d'un dispositif (« kick-down ») qui autorise une neutralisation temporaire du système. Ainsi, par un appui fort sur la pédale d'accélérateur, au-delà d'un point dur, le limiteur est momentanément mis hors service. Il sera réactivé dès que la vitesse du véhicule redeviendra inférieure à la vitesse autorisée. Les freins ne sont pas concernés par le dispositif et le conducteur peut donc en faire un usage normal à tout moment.
Dans le mode actif débrayable, contrairement au mode actif contraint, l'usager peut désactiver temporairement le système en appuyant sur un bouton.

90 conducteurs ont expérimenté le système LAVIA pendant 8 semaines (2 semaines par mode). Les véhicules équipés du système ont effectué au total plus de 16 300 trajets correspondant à plus de 130 000 km parcourus, 3 700 heures d'enregistrement de données et près de 27 millions de données recueillies par le système.

La ZELT a été chargée de l'exploitation des données LAVIA (Ehrlich et al., 2006) en collaboration avec l'INRETS, puis a rédigé une méthodologie afin d'effectuer des analyses spatiales sur les données LAVIA et a calculé des indicateurs spatialisés sous forme de carte.

2. Positionnement des points GPS sur le réseau

A partir d'un ensemble constitué d'un GPS, d'un odomètre et d'un gyromètre, le système LAVIA détermine la section de voirie sur laquelle le véhicule circule et la vitesse de consigne à respecter par l'usager. Le système localise le véhicule sur la carte interne du système, dénommée LUT, en réalisant l'opération dite de « map-matching » (Quddus et al., 2007). Dans les données recueillies, figurent pour chaque enregistrement, la position longitude/latitude du véhicule sur le réseau ainsi que l'identificateur de l'arc sur lequel a circulé le véhicule. Avant de réaliser l'analyse au niveau spatial des données LAVIA, il fallait contrôler le bon positionnement du véhicule sur le réseau, mais aussi déterminer dans quel sens les véhicules ont parcouru les arcs topologiques de la carte LAVIA. Pour ce faire, nous avons développé un algorithme de map-matching détectant et corrigeant les erreurs de localisation du système LAVIA.

2.1 Algorithme de map-matching

Le système LAVIA utilise un algorithme de map-matching « temps réel » permettant de positionner le véhicule sur le réseau. Cet algorithme prend en compte un certain nombre de paramètres tels que l'odomètre et la direction du véhicule pour déterminer l'arc sur lequel se situe le véhicule.

Nous utilisons un algorithme de map-matching hors ligne fondé sur la topologie du réseau afin de détecter les erreurs de positionnement du système LAVIA. Pour un trajet, l'algorithme cherche le chemin le plus proche des points GPS. A chaque traitement d'un point GPS, nous gardons en mémoire des arcs susceptibles d'être associés à ce point. A la différence des algorithmes temps réel, nous ne gardons pas l'arc le plus « probable » mais un ensemble d'arcs candidats.

La recherche du chemin le plus « proche » est réalisée de manière globale. Ce sont les points situés avant et après le point en cours de traitement qui déterminent l'arc à associer avec le point GPS traité. Prenons l'exemple suivant : le véhicule circule sur une autoroute ; la position délivrée par le GPS ne nous permet pas de dire si le véhicule se trouve, sur l'autoroute, sur la voie de décélération ou sur le réseau secondaire. Ce sont les positions avant et après celle en cours de traitement qui permettent de déterminer la voie où circule le véhicule.

2.2 Correction des erreurs de map-matching

L'algorithme de map-matching détecte les erreurs de positionnement du système LAVIA et les corrige à l'aide des données vitesse comme le montre la figure 1.

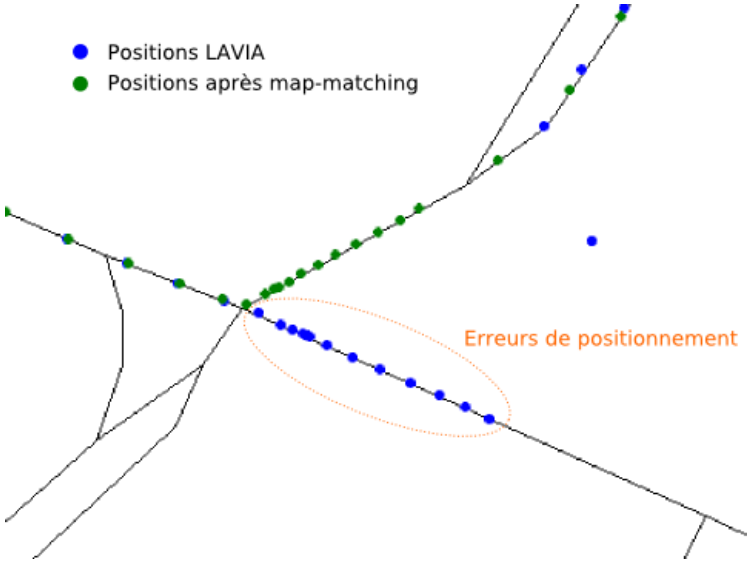


Figure 1 – Erreurs de positionnement LAVIA

L'algorithme apporte une information supplémentaire sur la position du véhicule : le sens de parcours de l'arc. Il s'agit d'une donnée importante puisque certains indicateurs peuvent différer fortement d'un sens de circulation à l'autre, par exemple l'émission de CO2 qui varie de manière significative selon que le véhicule gravit ou descend une côte.

2.3 Orientation des arcs de la carte

Ne disposant pas d'une carte orientée, c'est à dire ne connaissant pas dans quel sens peuvent être empruntés les arcs, nous orientons la carte LAVIA à partir des trajets effectués par les conducteurs (figure 2). Nous analysons tous les trajets effectués et nous comptabilisons le nombre de trajets effectués par sens sur chaque arc topologique. De cette étude, nous ne gardons que les arcs orientés parcourus au moins 5 fois par l'ensemble des expérimentateurs. En dessous de 5 trajets par arc orienté, nous ne disposons pas d'assez de données pour produire un quelconque indicateur le long de cet arc. La finalité de l'orientation de la LUT est de déterminer sur quel arc orienté nous établirons des statistiques et non pas d'orienter de façon exhaustive tous les arcs de la LUT.

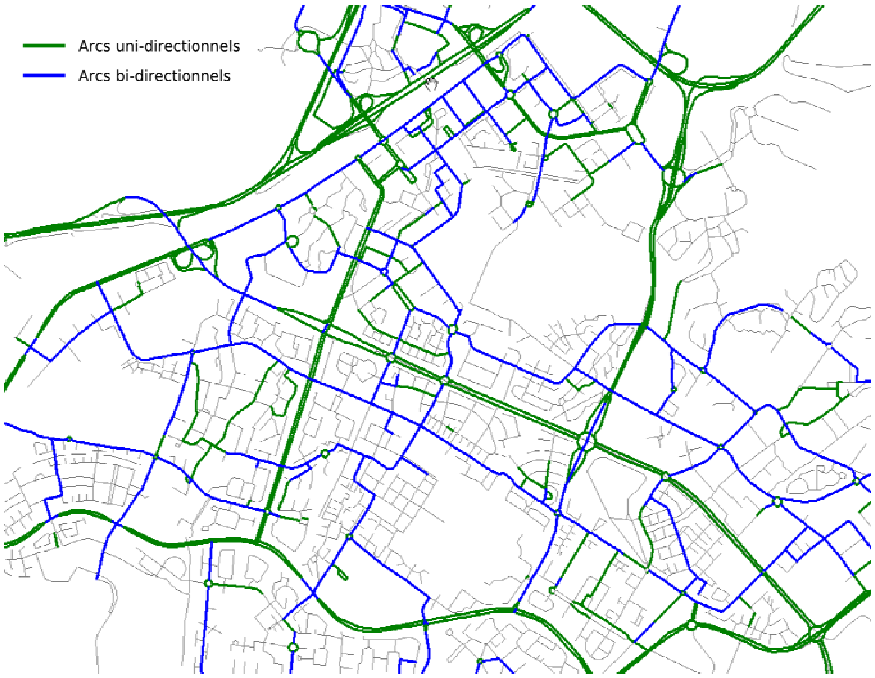


Figure 2 – Orientation des arcs de la carte LAVIA

3. Base de données spatialisées

La base de données spatialisées a été réalisée sous le système de gestion de bases de données PostgreSQL avec l'extension PostGIS qui permet de stocker des entités géométriques et d'effectuer des requêtes spatiales. Aux données initiales LAVIA, nous avons ajouté 4 attributs liés à la localisation des enregistrements :

- l'objet géométrique de type point correspondant à la position du véhicule délivrée par le système LAVIA ;
- l'arc orienté sur lequel circule le véhicule ;
- la position relative du véhicule sur l'arc orienté ;
- l'objet géométrique de type point correspondant à la position du véhicule après map-matching sur l'arc orienté.

Ces attributs supplémentaires ont été obtenus et calculés par l'algorithme de map-matching.
De nombreux logiciels SIG peuvent se connecter et exploiter une base de données spatiales PostgreSQL/PostGIS mais ils ne disposent pas d'outils adéquats pour l'analyse et l'agrégation de données localisées sur un réseau. Il a donc fallu définir et produire nos propres indicateurs spatialisés.

4. Les indicateurs spatialisés

Les données étant localisées sur un réseau, nous les agrégeons par section de voirie afin de produire des indicateurs spatialisés. Les arcs de la carte LAVIA étant de longueurs très variables, nous avons choisi de les découper en sections de longueur équivalente, définie arbitrairement à une longueur inférieure à 10 mètres. Cette manipulation ne concerne que les arcs pour lesquels le calcul d'indicateur est possible, c'est à dire ceux parcourus au moins 5 fois par l'ensemble des usagers. Ce travail est effectué par le module PostGIS. En réalisant cette opération, nous obtenons un nouveau réseau composé de plus de 65 000 sections de longueur inférieure à 10 mètres.

Pour chacun de ces tronçons nous calculons un certain nombre d'indicateurs selon des groupes d'usagers (les prudents, les défieurs,..) et des modes de conduite (neutre, informatif, actif débrayable ou actif contraint). Citons quelques indicateurs calculés : le 85ème centile des vitesses dans les différents modes de conduite, les centiles des écarts entre les vitesses pratiquées et les vitesses de consigne, le taux d'utilisation du kick-down, le pourcentage de trajets en limitation active (état du système limitant l'injection afin que le conducteur respecte les limitations de vitesse).

5. Distributions spatiales de vitesse

Nous décrivons dans cette partie la méthodologie suivie pour obtenir des distributions spatiales de vitesse. Elle peut être élargie aux autres indicateurs spatialisés mentionnés au §4.

5.1 Méthodologie

Nous découpons le réseau considéré en sections de longueur inférieure à 10 mètres sur lesquelles nous calculons un indicateur de vitesse à chaque passage d'un véhicule sur ce tronçon. Les données sont recueillies par intervalle de temps ; il est donc nécessaire d'effectuer une transformation des données afin d'obtenir des vitesses par section de voirie. Pour cela nous reconstituons, sur chaque arc emprunté par l'usager, les profils de vitesse à partir desquels nous attribuons une vitesse sur chaque section. Si sur un arc, nous comptabilisons N passages de véhicules, nous disposons pour chacune des sections composant l'arc de N vitesses. Nous choisissons ensuite de définir comme indicateur de vitesse pour chaque section le 85ème centile des vitesses.

5.2 Reconstitution d'un profil de vitesse sur un arc topologique

Lorsqu'un véhicule circule sur un arc topologique A, nous récupérons sa localisation par des points délivrés par le GPS embarqué du LAVIA toutes les secondes. Nous reconstituons le profil de vitesse à partir de ces points et des vitesses instantanées du véhicule.

L'objectif est d'estimer une vitesse en tout point de l'arc (figure 3). En effet, dans les données, lorsqu'un véhicule circule à 130 km/h, le système LAVIA délivre une position et une vitesse tous les 36 mètres tandis que pour un véhicule circulant à 10 km/h, le système délivre des informations tous les 3 mètres. Entre deux abscisses curvilignes successives, nous considérons que la vitesse évolue linéairement en fonction de la distance parcourue.

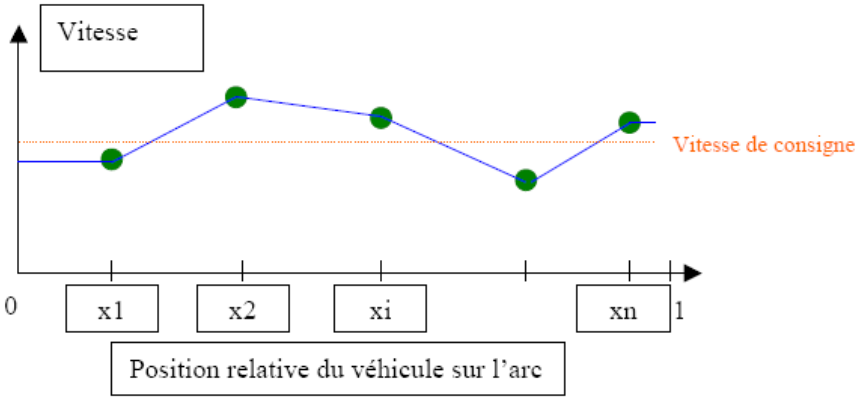


Figure 3 – Profil de vitesse sur un arc

5.3 Attribution d'une vitesse par tronçon pour un trajet

Soit A un arc orienté.
Soient x_1, x_2,…, x_n les positions relatives successives du véhicule sur l'arc orienté A et v_1, v_2,…, v_n les vitesses associées.
Nous traçons le profil de vitesse en utilisant la méthode décrite en 5.2.
Soit nt, le nombre de tronçons de cet arc.
Soit T_i, le $i^{ème}$ tronçon de l'arc orienté (i <= nt).
Nous cherchons à attribuer une vitesse V_{Ti} pour le tronçon T_i de l'arc A.
Soit X_{Ti}, l'abscisse curviligne du centre du tronçon T_i.
Soient $X_1 = \min_i(x_i \geq X_{Ti})$ et $X_2 = \max_i(x_i < X_{Ti})$, les positions des points les plus proches et situées de part et d'autre de l'abscisse X_{Ti} pour laquelle nous désirons déterminer une vitesse à associer.
A partir des deux points de coordonnées (X_1,V_1) et (X_2,V_2), nous calculons la vitesse V_{Ti} associée au tronçon T_i en supposant que la vitesse évolue linéairement entre les abscisses X_1 et X_2.

$$V_{Ti} = a \times X_{Ti} + b \text{ avec } a = \frac{(V_2 - V_1)}{(X_2 - X_1)} \text{ et } b = V_2 - a \times X_2 \qquad (1)$$

5.4 Obtention d'un indicateur de vitesse pour chaque tronçon

Soit A l'arc orienté considéré. Soit nt le nombre de tronçons de cet arc. Soit N le nombre de trajets passant par l'arc orienté. Pour chaque tronçon de l'arc orienté, nous disposons de N vitesses obtenues d'après la méthode décrite dans la paragraphe 5.3. De cet échantillon de N vitesses, nous choisissons comme indicateur de vitesse, le 85ème centile de cet échantillon (Si nous disposons d'un jeu de 100 vitesses, nous les ordonnons et nous choisissons la 85ème vitesse la plus élevée correspondant au 85ème centile de l'échantillon).

Ce choix permet de s'affranchir des vitesses excessives (15 % des vitesses les plus élevées) et aussi des situations de congestion (vitesses les plus faibles).

6. Visualisation des indicateurs et exemples de carte

Les indicateurs spatialisés sont stockés sous PostGIS et sont associés à une section de voirie. Ils peuvent être visualisés et analysés par n'importe quel logiciel SIG en vue de produire des cartes synthétiques.

Nous visualisons les indicateurs spatialisés sous MapInfo, logiciel SIG qui permet de faire des analyses thématiques sur les différents indicateurs calculés par section. Nous utilisons aussi Google Earth qui nous permet de visualiser en 3D des distributions de vitesse.

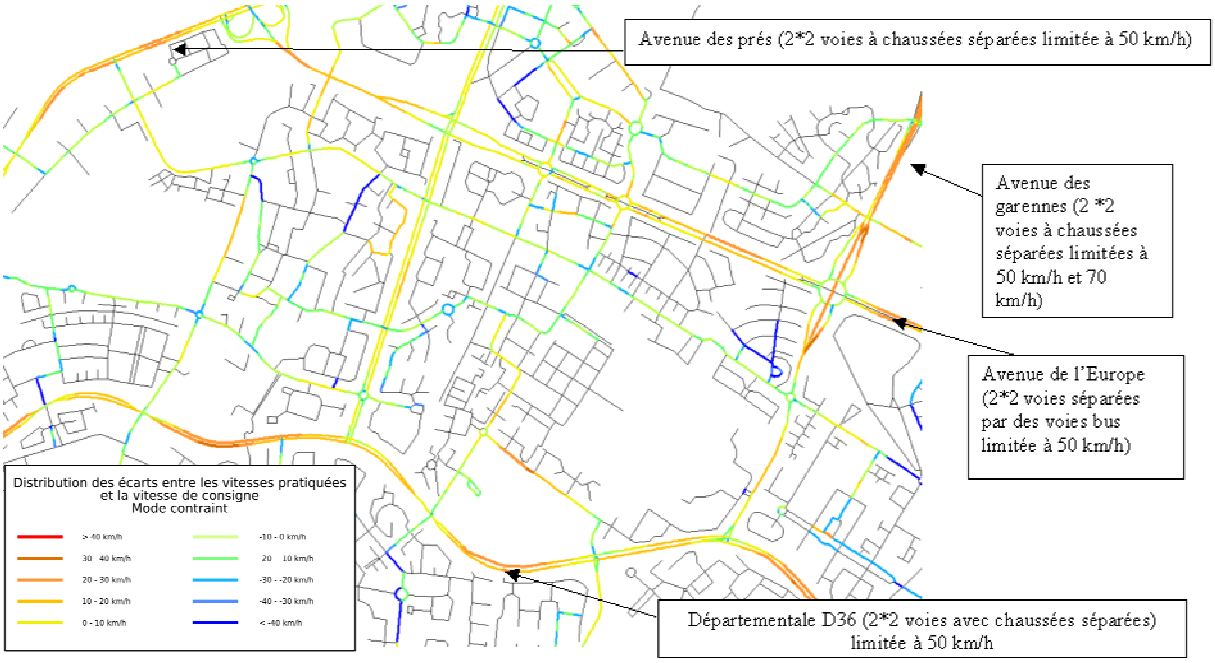


Figure 4 – Distribution des écarts entre les vitesses pratiquées et la vitesse de consigne

La figure 4, où est représentée la distribution du 85ème centile des écarts entre vitesses pratiquées et vitesse de consigne dans le mode contraint, indique que la représentation spatiale permet de localiser les dépassements de vitesse et de comprendre pourquoi certains usagers effectuent des kick-downs en milieu urbain. Nous observons notamment que les dépassements de vitesse les plus élevés sont effectués sur les routes à 2 x 2 voies à chaussées séparées. Le profil de vitesse dépend très fortement de la géométrie de la voirie. L'agrégation des données par limitation de vitesse masque de nombreuses disparités de comportement de l'usager. Il est donc préférable de classifier les différentes sections de voirie en utilisant par exemple des outils statistiques d'analyse de données sur les indicateurs spatialisés définis précédemment, avant de modéliser les comportements des usagers avec et sans aide à la conduite.

Sur la figure 5, nous avons représenté le taux d'utilisation du kick-down au niveau de l'échangeur entre une autoroute et une route nationale, toutes les deux limitées à 110 km/h. Nous remarquons des valeurs très élevées sur certaines bretelles en raison de vitesses trop faibles imposées par le système. Dans ces situations, les usagers sont conduits à ne plus respecter les limitations de vitesse à 50 km/h imposées par le système LAVIA et inadaptées à une conduite « normale » puisqu'ils circulent sur une voie d'accélération menant à une voie rapide.

La figure 4 et la figure 5 montrent deux configurations de voirie où les usagers ne respectent pas les consignes du système LAVIA pour des raisons différentes : sur une route à 2 x 2 voies à chaussées séparées limitée à 50 km /h, la géométrie de la voirie incite l'usager à dépasser volontairement les limitations de vitesse tandis que sur une voie d'accélération limitée à 50 km/h, les usagers ne respectent volontairement pas les limitations imposées par le système qui ne leur permettent pas de s'insérer correctement et en toute sécurité sur la voie rapide.

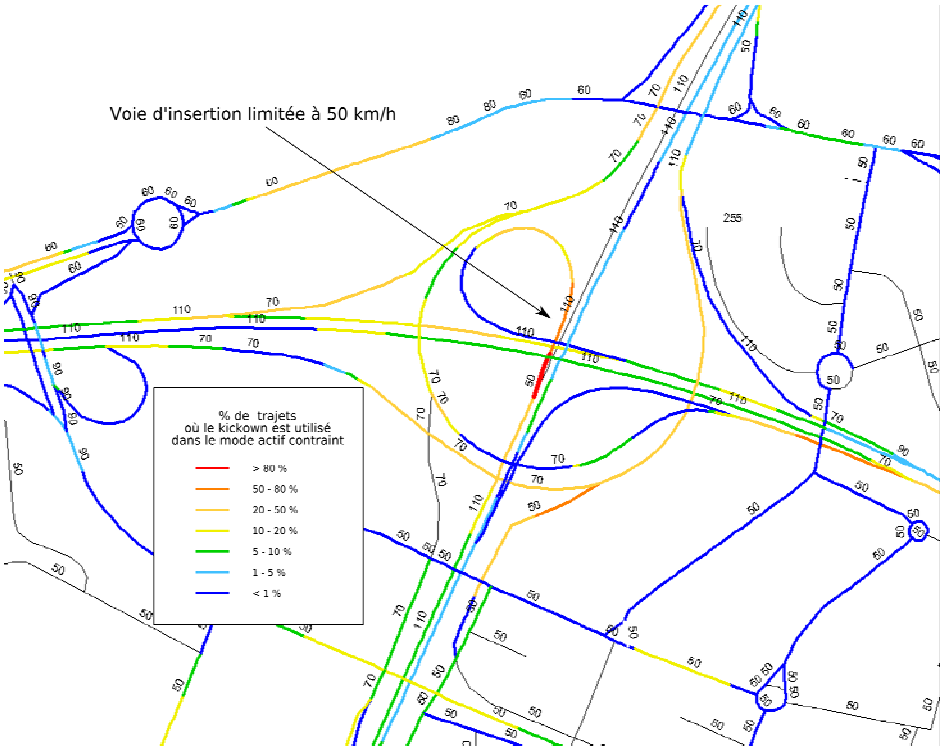


Figure 5 – Utilisation du kick-down

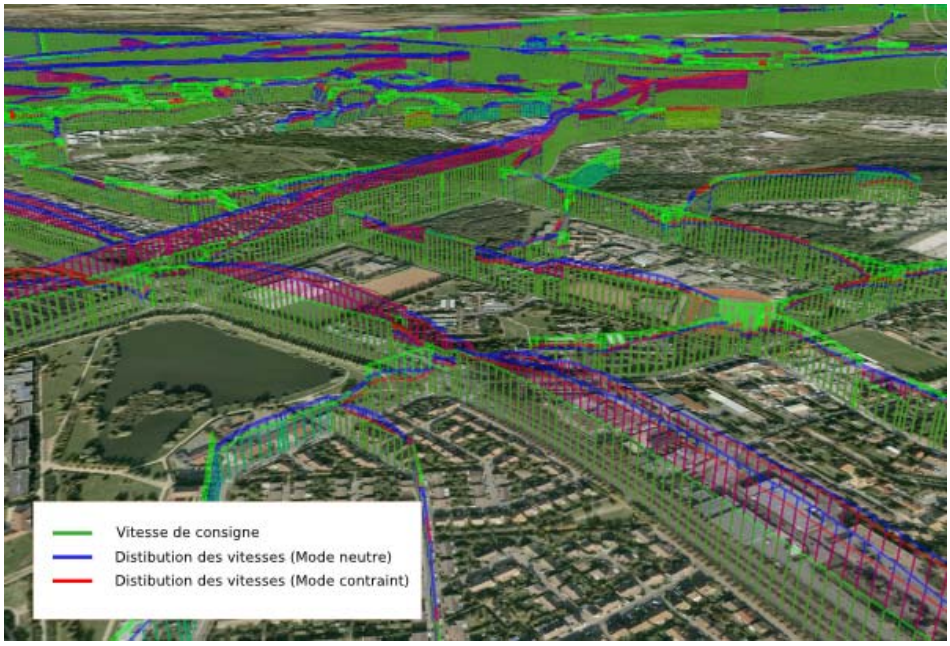


Figure 6 – Distribution des vitesses sous Google Earth

Nous avons représenté sur la figure 6, sous Google Earth, des profils de vitesse sous forme de courbe en mode neutre et en mode contraint en 3D. Ce logiciel ne nous permet pas d'analyser les différents indicateurs mais nous permet néanmoins de les visualiser et de mieux apprécier les comportements des usagers sur certaines sections de voirie.

7. Conclusion et prochaines étapes

En complément d'une analyse statistique classique des données, l'approche spatiale permet de mieux appréhender les comportements des usagers avec ou sans système d'aide à la conduite. La prise en compte de la configuration et de la géométrie de la voirie ont mis en évidence pourquoi les usagers ne respectaient pas les limitations de vitesse sur certains axes et les sections où le système d'aide leur était particulièrement utile. L'analyse spatiale fournit une cartographie assez précise des zones à risque où il faudrait agir sur les limitations de vitesse ou sur la géométrie du réseau.

L'obtention d'indicateurs spatialisés permet de ne plus se limiter à des calculs d'indicateurs par trajet ou par individu mais de travailler sur des sections de voirie sur lesquelles nous pouvons modéliser le comportement des usagers.

A partir de bases de données provenant de véhicules traceurs, une analyse spatiale permet d'extraire des informations et d'associer des indicateurs à certaines sections de voirie. Dans cet article, nous nous sommes limités à l'analyse spatiale des vitesses. Nous pouvons aussi en utilisant d'autres variables, déterminer les meilleures itinéraires entre deux points du réseau en termes de temps de parcours, de consommation ou encore de confort de conduite.

Les résultats de l'analyse spatiale sont en cours d'exploitation. L'une des prochaines étapes consiste à modéliser les comportements des usagers selon le type d'infrastructure avec et sans aide à la conduite. Pour cela, nous classifierons les éléments du réseau par une analyse statistique multidimensionnelle, puis nous modéliserons les différents types de comportement des usagers selon différentes configurations d'infrastructure.

Références

- Ehrlich, J. (2002), « LAVIA : le projet français de limiteur de vitesse adaptatif », Proceedings E-Safety Congress.
- Ehrlich, J., Saad, F., Lassarre, S. and Romon S. (2006), "Assessment of LAVIA speed adaptation systems : experimental design and initial results on system use and speed behavior", Proceedings of the ITS World Congress.
- Quddus, M.A., Ochieng, W.Y, Noland, R.B. (2007), "Current map-matching algorithms for transport applications : State-of-the art and future research directions", Transport Research Part C,15, 312-328.

SESSION 5

Applications à la gestion du trafic, aux populations vulnérables et au domaine urbain

Animateur : Marie-Madeleine Le Marc (INRETS)

CARACTERISATION DE L'ECO-CONDUITE ET CONSTRUCTION D'UN INDICATEUR DYNAMIQUE POUR VEHICULES THERMIQUES

Docteur en Statistique de l'Université Toulouse III en 2003 et membre successif de divers laboratoires de recherches (Université d'Orsay, INRIA, IRCAM, INRETS). Chargé de recherche depuis 2007 au LIVIC, unité mixte INRETS/LCPC.

Titulaire d'un diplôme de Master2 en Statistique appliquée de l'Université Paris VI. Ingénieur de recherche au LIVIC, unité mixte INRETS/LCPC.

Guillaume SAINT PIERRE **Cindie ANDRIEU**
Laboratoire sur les Interactions Véhicules-Infrastructure-Conducteurs (LIVIC)
Unité mixte INRETS/LCPC
Versailles, France

Résumé
Les effets de l'éco-conduite sur la consommation de carburant et les émissions de GES sont bien connus, mais il y a encore peu de moyens à disposition pour la caractériser et la détecter. Ce travail présente les premiers résultats d'une expérience destinée à mesurer les effets des consignes d'éco-conduite sur le comportement. Après une description multicritère des effets observés, il est procédé à une sélection statistique des variables les plus pertinentes à partir d'une grande quantité de mesures et d'indicateurs tirés de la littérature. L'objectif étant d'ouvrir la voie à la mise au point d'un système embarqué d'aide à l'éco-conduite, les caractéristiques principales du comportement de conduite sont utilisées pour construire un indicateur dynamique et agrégé du niveau d'efficacité énergétique de la conduite. Un tel indicateur reposant sur un modèle probabiliste peut être utilisé pour détecter une conduite souple ou consommatrice, et afficher des informations ciblées destinées à permettre au conducteur de corriger et d'évaluer l'efficacité énergétique de sa conduite.

Mots-clés :.éco-conduite, systèmes embarqués d'aide à la conduite économe, régression logistique, systèmes de transports intelligents.

Abstract
Effects of eco-driving on fuel consumption and greenhouse gas emissions are well known, but less studied are its characterization. This paper present the first results of an experimental study designed to measure eco-driving behavior. Relevant indicators are identified among a wide range of parameters using multidimensional statistical methods. In order to clear the path leading to the construction of an efficient Ecological Driving Assistance System (EDAS), an attempt is made to construct a dynamic indicator of a fuel-efficient driving style using logistic regression. Such an indicator can be used to detect low-consumption behavior and to display useful advices in order to help the driver improving his driving efficiency without deteriorating safety.

Keywords: eco-driving, ecological driving assistance system, logistic regression, intelligent transportation systems.

1. Introduction

La prise de conscience des problèmes liés à l'augmentation de la teneur en CO2 de l'atmosphère a modifié la perception des actions de sécurité routière. Il y a encore peu de temps, les systèmes d'aides à la conduite avaient pour objectif essentiel de prévenir les défaillances du conducteur ou de diminuer la gravité des accidents. Le paradigme a évolué, et un nouveau champ d'étude s'intéresse aux systèmes d'aide à la conduite écologique (EDAS, Ecological Driving Assistance System), destinés à associer gestion du risque et efficacité énergétique. En effet, la recherche d'une conduite optimale en termes à la fois de sécurité, d'efficacité économique (temps de trajet par ex) et d'économies d'énergie, est devenue un enjeu majeur. L'adaptation des systèmes d'aides existants semble cependant difficile, malgré quelques tentatives pour réduire la consommation de carburant en agissant de façon simple sur le comportement de conduite. Par exemple, l'idée d'une pédale d'accélérateur résistante au-delà d'un certain point semble judicieuse mais n'apporte aucune réduction de consommation (Larsson and Ericsson, 2009). De même l'étude de l'impact des systèmes de régulation automatique de la vitesse (ISA, Intelligent Speed Adaptation) (Ehrlich, 2010) pour un état de l'art sur la consommation de carburant, montre que l'on obtient rarement une réduction significative (Regan et al. 2006, Carsten et al. 2008, Saint Pierre and Ehrlich, 2008). Aider le conducteur à réduire ses dépenses énergétiques sans diminuer la sécurité ni le temps de parcours est donc un enjeu réel. Ce compromis peut être atteint en pratiquant ce que l'on nomme « éco-conduite », ou conduite « éco-responsable ».

Ce type de conduite est connu et étudié depuis longtemps par nos voisins européens, mais la France reste encore prudente quand à sa généralisation, et ce malgré des décisions prises en ce sens lors du grenelle de l'environnement. Les gains de consommation varient pourtant entre 5 et 20% selon les estimations (Vermeulen, 2006), avec un effet positif sur le confort de conduite et un faible impact sur le temps de trajet. Il semble qu'il y ait pourtant un grand nombre de questions encore sans réponses, qui justifient la poursuite d'un travail d'étude de l' « éco-conduite ». On peut trouver dans le rapport de la Commission Internationale des Examens de Conduite Automobile (CIECA, 2007), une présentation exhaustive des questions qui agitent le monde des professionnels : L'éco-conduite est elle source de confusion pour le conducteur novice ? La consigne consistant à éviter les freinages a-t-elle un impact sur les distances inter-véhiculaires ? Comment harmoniser les consignes et les rendre aisément interprétables ? Ces interrogations sont à ce jour sans réponses scientifiques claires et c'est pour tenter d'en apporter que le travail présenté ici a été mené.

Après une description des objectifs, des moyens mis en œuvre et du plan d'expérience utilisé pour cette expérimentation, nous donnerons les résultats obtenus concernant l'impact des consignes d' « éco-conduite » sur le comportement de conduite. Des analyses statistiques multidimensionnelles seront ensuite menées afin de déterminer les indicateurs les plus pertinents associés à une conduite économe en énergie. Après avoir convergé vers une sélection de seulement cinq paramètres aisément interprétables, nous en déduirons un modèle statistique permettant de caractériser l'« éco-conduite ». Nous en déduirons un « éco-index » variant de façon dynamique entre 0 et 100, et permettant au conducteur d'évaluer simplement ses propres capacités de conduite. Dans la conclusion nous tenterons de montrer qu'un tel indicateur agrégé peut être utilisé pour concevoir un système de type EDAS.

2. Objectifs de l'étude

La France n'avait jusqu'ici pas étudiée scientifiquement l'impact des consignes d' « éco-conduite » sur le comportement. Des études étrangères existent (Johansson et al. 1999), mais aucune ne traite des éventuels effets pervers signalés par les professionnels. L'objectif de ce travail est avant tout d'effectuer le premier recueil de données en France pour la communauté scientifique, tout en essayant de mesurer des paramètres de sécurité (distances inter-véhiculaires par exemple) généralement peu étudiés. Le second objectif est d'avancer vers la mise au point d'une EDAS par le biais d'un indicateur indépendant de la consommation de carburant. En effet, la consommation de carburant est étroitement liée aux conditions extérieures (type de route, trafic environnant, pente etc.), et ne constitue pas un bon indicateur de la « souplesse » de conduite. Selon certains professionnels, l'affichage de la consommation instantanée peut même entraîner une perte d'efficacité de conduite. L'objectif de ce travail est donc la mise au point d'un indicateur « objectif » de la conduite économe ne nécessitant pas de connaissances des conditions extérieures, généralement très difficiles à observer.

3. Méthodologie

3.1 Description de l'expérience

Le but de cette expérience était d'identifier clairement deux types de conduite : une conduite « normale » et une conduite économique en termes de consommation de carburant. L'expérience s'est déroulée en juin et juillet 2009 à Ponchartrain (Yvelines 78). Dix sept conducteurs volontaires recrutés parmi le personnel du LCPC et de l'INRETS (chercheurs, techniciens, administratifs) y ont participé, ainsi que quatre moniteurs d'éco-conduite issus de l'AFT-IFTIM et du Ministère de la Défense. Même si le nombre de sujets est faible, il est important de noter que la répartition des conducteurs en fonction de leurs connaissances préalables de l'éco-conduite est homogène (aucune connaissance : 6 sujets ; connaissances théoriques : 5 sujets ; connaissances pratiques : 6 sujets ; moniteurs : 4 sujets). Le circuit choisi est un trajet de type inter-urbain, d'une longueur de 14km, et comportant une variabilité intéressante des situations de conduite. Tous les trajets ont été effectués sur route sèche et à des heures où la circulation est fluide (10h-12h et 14h-16h) afin de limiter l'influence du trafic. Le véhicule utilisé est une Renault Clio III Essence 1,2l TCE 100cv à boîte manuelle. Après une prise en main du véhicule et une découverte du parcours effectuée par l'expérimentateur, chaque conducteur a effectué deux fois le trajet: une fois en conduisant normalement, et une seconde fois en suivant les consignes d'éco-conduite issues du projet EcoDrive financé par la Commission Européenne. Ces consignes sont les suivantes:

1) Passer à la vitesse supérieure dès que possible : entre 1500 et 2000 tr/min.
2) Maintenir une allure constante : enclencher la plus haute vitesse possible et conduire avec un régime moteur faible.
3) Anticiper le trafic : regarder le plus loin possible et anticiper le trafic environnant.
4) Décélérer progressivement : s'il faut ralentir ou s'arrêter, décélérer progressivement en relâchant l'accélérateur à temps et en laissant la voiture en prise.
5) Vérifier régulièrement la pression des pneus.

Ces consignes ont été données au conducteur avant son trajet en conduite économique. Notons que la dernière consigne ne concerne pas le conducteur pour cette expérience, le véhicule ayant été contrôlé au préalable par l'équipe expérimentale. Chaque conducteur effectue donc deux trajets : l'un avec une conduite « normale » et l'autre avec une conduite « économique ». D'autre part, afin de limiter les effets d'apprentissage, une inversion de l'ordre des trajets ("Normal" et "Economique") a été effectuée pour la moitié des sujets.

3.2 Données issues de l'expérience

De manière similaire à Beusen et al. (2009), les données recueillies au cours de l'expérience proviennent en grande partie du bus CAN du véhicule. Ces données concernent les paramètres du moteur et du véhicule, ainsi que les actions du conducteur. Le véhicule a aussi été équipé d'un GPS, d'une caméra et d'un radar situés à l'avant du véhicule. Un débitmètre (DFL1x-5bar) a également été utilisé afin de valider la consommation de carburant mesurée par le bus CAN. Enfin, d'autres variables ont été ajoutées telles que les consignes de limitation de vitesse, les rapports de boîte de vitesse, ainsi que de nombreux indicateurs donnés au tableau 1 et inspirés de Ericsson (2001). Les données issues du radar n'ont pu être utilisées.

4. Résultats

4.1 Impact des consignes d'éco-conduite

Les résultats numériques obtenus sont résumés dans le tableau 1. La consommation moyenne de carburant pour les vingt et un conducteurs est de 6.90l/100km en conduite normale et de 5.99l/100km en conduite économique, soit une baisse de 13% entre les deux types de conduite, cette baisse allant jusqu'à 26% pour certains. Ces résultats montrent qu'il semble assez simple de réduire sa consommation de carburant en appliquant certaines règles de base de l'éco-conduite. La vitesse moyenne et le pourcentage de temps passé au-delà de la vitesse limite ont baissé respectivement de 6.3% et 31.6%, ce qui traduit un meilleur respect des limitations de vitesse en conduite économique. Les résultats relatifs à la gestion de l'accélération et du freinage sont en accord avec les 2ème et 3ème principes de l'éco-conduite. Ainsi l'accélération est de 0.50 m/s² en moyenne en conduite normale et 0.38 m/s² en conduite économique, et le pourcentage d'enfoncement de la pédale d'accélérateur a baissé d'environ 12%. Le nombre de freinage par kilomètre a baissé d'environ 30%. Cependant le pourcentage de temps passé en frein moteur n'a augmenté que de 2% en conduite économique. Cette différence n'est pas significative statistiquement mais montre que cette technique est encore peu familière de la plupart des conducteurs et nécessiterait une formation d'ordre pratique. Ceci est confirmé par le fait que les moniteurs d'éco-conduite ont davantage utilisé le frein moteur lors de leur trajet en conduite économique que les autres conducteurs. Enfin, l'un des principes fondamentaux de l'éco-conduite est de conduire avec un rapport de boîte élevé et un régime moteur faible. Comme le montre le tableau 1, le régime moteur moyen ainsi que le régime moteur auquel s'effectue le changement de vitesse sont plus faibles en conduite économique. De plus, la vitesse 5 est nettement plus utilisée en conduite économique, alors que la vitesse 3 l'est beaucoup moins, ce qui implique un régime moteur plus faible et donc une consommation de carburant plus faible.

4.2 Analyse factorielle

Dans une première partie, une classification des 40 variables décrites dans le tableau 1 (excepté la consommation de carburant) a été effectuée afin d'en réduire le nombre, tout en conservant un pouvoir descriptif. Cette classification a permis de distinguer dix principaux groupes de variables porteuses d'informations similaires. Pour chacun de ces groupes, les variables les plus significatives mais aussi les plus simples à interpréter ont été conservées. Les dix variables sélectionnées sont les suivantes: MeanRegime, MeanPosAcc, StdAccel, SumChangeVitesse, TempsArrete, TempsHorsConsigne, TempsFreinMoteur, TempsVitesse NonOptimale, PKE, FreinageParKm.

Tableau 1 – Variables et indicateurs

Variable nom	Description	Moyenne conduite normale	Moyenne eco-conduite	pourcentage écart
MeanVitesse	Vitesse Moyenne	50.71	47.52	-6.30
MeanAccelPos	Accélération moyenne du véhicule	0.50	0.38	-24
MeanAccelNeg	Décélération moyenne du véhicule	-0.62	-0.52	-16.13
MeanRegime	Moyenne du régime moteur	2100.37	1824.07	-13.15
MeanPosAcc	Moyenne du pourcentage d'enfoncement de la pédale d'accélérateur	15.83	13.90	-12.18
StdVitesse	Ecart-type de la vitese	18.29	16.35	-10.60
StdAccel	Ecart-type de l' accélération/décélération	0.71	0.57	-19.77
stdRegime	Ecart-type du régime moteur	490.69	428.91	-12.59
stdPosAcc	Ecart-type du % d'enfoncement de la pédale d'accélérateur	15.76	13.61	-13.62
SumChangeVitesse	Nombre de changements de vitesse	110.86	115.95	4.60
ConsoCanL100	Consommation moyenne (l/100km) mesurée par le bus CAN	6.90	5.99	-13.11
TempsArrete	% de temps de trajet passé à l'arrêt	2.78	2.71	-2.79
TempsHorsConsigne	% de temps de trajet passé au-delà de la vitesse de consigne	37.77	25.85	-31.55
RM_sup_3500	% de temps passé avec un régime moteur > 3500 tr/min	0.58	0.31	-45.36
va_sup_15	% de temps passé avec (va) > 15	26.12	20.52	-21.42
TempsFreinMoteur	% de temps passé en frein moteur (vitesse > 0 et pas de pression sur la pédale d'accélérateur)	36.18	36.98	2.20
TempsPointMort	% de temps passé au point mort	3.63	3.52	-3.12
TempsVitesseNonOptimale	% de temps passé avec une vitesse non-optimale (régime moteur > 3000 tr/min et pression sur la pédale d'accélérateur)	2.27	0.38	-83.17
PKE	Positive kinetic energy : PKE= $\frac{\sum(v_f^2-v_s^2)}{x}$ avec dv/dt>0 v_f =final speed, v_s =start speed, x =distance	0.35	0.24	-30.84
MeanRMChangeVitesse	Moyenne du régime moteur auquel se fait le changement de vitesse	1798.86	1587.25	-11.76
SumArret	Nombre d'arrêts	1.62	1.95	20.59
MeanDureeArret	Durée moyenne des arrêts (sec)	9.18	10.97	19.54
RPA	Relative positive acceleration : $\frac{1}{x}\int va^+dt$ with x =durée totale du trajet v =vitesse, a^+ =accélération > 0	2.97	2.15	-27.60
IntegraleCarreAcc	Intégrale du carré de l'accélération	0.03	0.02	-36.24
MaxVitesse	Vitesse maximale	84.73	77.35	-8.72
MaxRegime	Régime moteur maximal	3749.68	3313.59	-11.63
MaxPosAcc	Maximum du % d'enfoncement de la pédale d'accélérateur	65.00	52.20	-19.69
FreinageParKm	Nombre de freinages par kilomètre	2.74	1.94	-29.37
DistFreinTot	Distance parcourue en freinant		1.39	-33.11
Gear_1	% de temps passé en vitesse 1	2.05	1.56	-24.08
Gear_2	% de temps passé en vitesse 2	8.68	6.39	-26.37
Gear_3	% de temps passé en vitesse 3	29.79	21.01	-29.49
Gear_4	% de temps passé en vitesse 4	31.12	29.95	-3.77
Gear_5	% de temps passé en vitesse 5	24.72	37.57	52.01
Vit_inf_30	% de temps passé avec une vitesse comprise entre 0-30 km/h	12.78	13.28	3.97
Vit_30_70	% de temps passé avec une vitesse comprise entre 30-70 km/h	72.61	81.23	11.87
Vit_sup_70	% de temps passé avec une vitesse > 70 km/h	14.61	5.49	-62.43
TempsAccNeg	% de temps passé avec une accélération comprise dans l'intervalle $[-10,-1]m/s^2$	7.01	4.51	-35.76
TempsAccMed	% de temps passé avec une accélération comprise dans l'intervalle $[-1,1]m/s^2$	86.25	92.42	7.16
TempsAccPos	% de temps passé avec une accélération comprise dans l'intervalle $[1,10]m/s^2$	6.74	3.07	-54.42

Afin de décrire au mieux notre échantillon, une analyse en composantes principales (ACP) de l'ensemble des trajets a été effectuée à partir des dix variables sélectionnées précédemment. L'ACP est une méthode descriptive d'analyse de données permettant de remplacer les variables initiales par quelques axes qui seront à la fois interprétables facilement et représentatifs de l'information contenue dans le nuage de point. Par projection sur les deux axes principaux, on obtient alors une représentation en deux dimensions du nuage de points (premier plan factoriel). La figure 1 est un graphique mis au point par Eric Lecoutre et réalisé avec le logiciel R. Ce graphique représente les résultats de l'ACP avec le cercle des corrélations (permettant de visualiser les liaisons entre les variables initiales et les nouveaux axes) et le premier plan factoriel, ainsi que l'arbre résultant d'une classification de l'ensemble des trajets. Sur le premier plan factoriel, la couleur de représentation des individus correspond à leur groupe d'appartenance (résultant de la classification des trajets illustrée par l'arbre), et leur taille varie selon leur poids dans la construction des axes. Les individus représentés par leur numéro correspondent aux valeurs extrêmes (trajets atypiques).

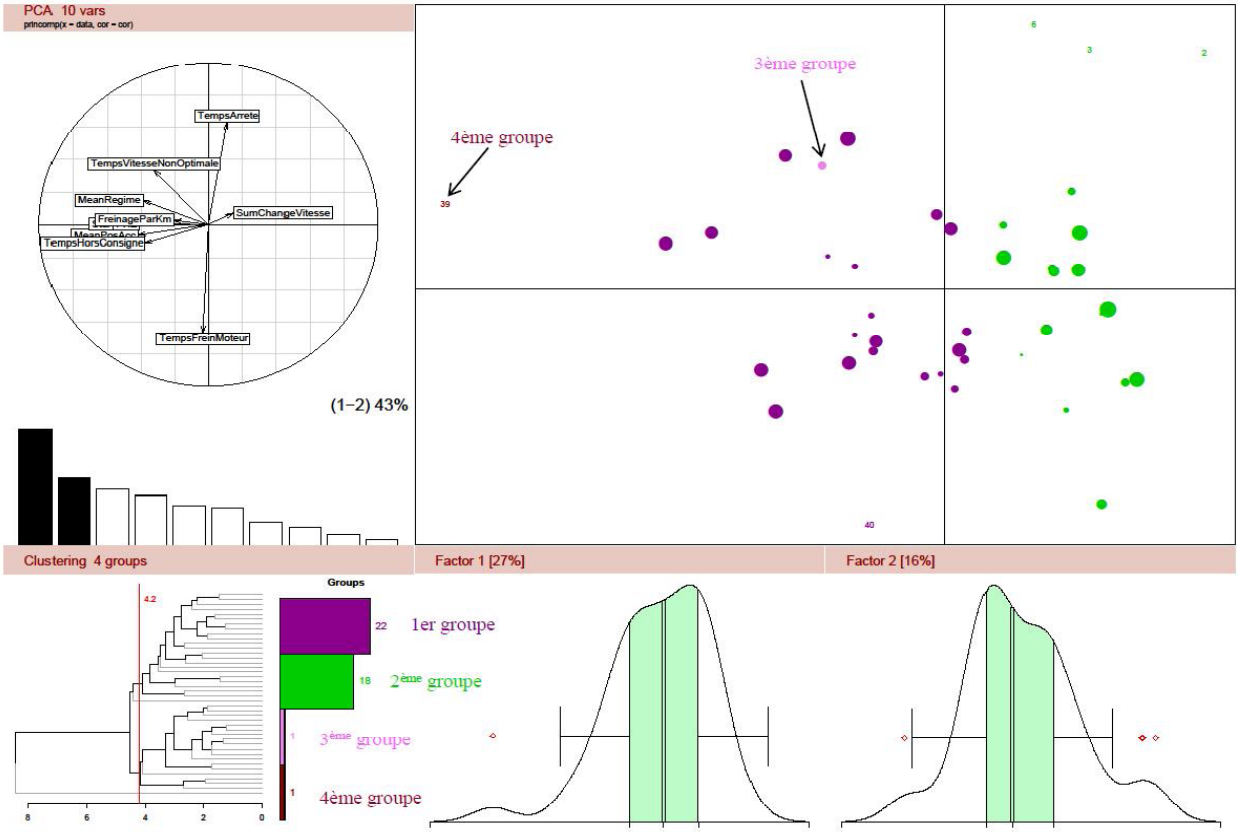


Figure 1 - Analyse en composantes principales et classification ascendante hiérarchique

Ce graphique permet de distinguer deux groupes principaux :

- les trajets avec de fortes accélérations, un régime moteur élevé, de nombreux freinages, et donc une consommation de carburant élevée;
- les trajets avec de faibles accélérations, un régime moteur peu élevé, peu de freinages, et donc une consommation de carburant plus faible.

Le premier groupe est constitué principalement de trajets effectués en conduite normale (16 "normal" et 6 "eco"), alors que le second groupe correspond à des trajets effectués en conduite économique (15 "eco" et 3 "normal"). Notons aussi que la classification a fait apparaître deux groupes constitués chacun d'un seul trajet. Ainsi le troisième groupe correspond à un trajet

avec un régime moteur élevé et peu de changements de rapport de boîte de vitesse. Le quatrième groupe possède les mêmes caractéristiques que le troisième groupe avec en plus de très fortes accélérations et un temps passé avec une vitesse non optimale particulièrement élevé, ce qui caractérise une conduite nerveuse.

5. Modèles de prédiction

5.1 Modèles de prédiction de la probabilité d'être en éco-conduite

Cette partie est basée sur l'élaboration d'un modèle de prédiction de la probabilité d'être en situation d'éco-conduite. L'objectif ici est de prédire la variable binaire "Trajet" qui prend la valeur 0 lorsque le trajet a été effectué avec une conduite normale (noté "normal"), et la valeur 1 lorsque le trajet a été effectué avec une conduite économique (noté "eco"). Il apparaît, suite à l'analyse descriptive précédente, que les dix variables utilisées sont encore trop corrélées pour certaine d'entre elles. Afin d'éviter des problèmes de multicolinéarité, une étape supplémentaire de sélection de variable a été menée. Nous avons donc finalement isolé cinq variables indépendantes entre elles, reliées à la consommation de carburant, et aisément interprétables. Ce sont les suivantes : MeanPosAcc, TempsArrete, TempsFreinMoteur, PKE, FreinageParKm Le modèle de prédiction de la probabilité d'être en situation d'éco-conduite a ensuite été construit par régression logistique, qui est une méthode appropriée lorsque la variable de réponse Y n'est pas quantitative mais qualitative ou catégorielle. Le modèle logistique avec les cinq variables explicatives sélectionnées, obtenu à l'aide de la procédure LOGISTIC du logiciel SAS, est le suivant :

$$Logit\,[\,P\,[Trajet = Eco \mid \Theta\,]] = 38.581 - 1.432 \times MeanPosAcc - 0.855 \times TempsArrete + 0.138 \times TempsFreinMoteur - 44.702 \times PKE - 2.961 \times FreinageParKm \quad (2)$$

où le paramètre Θ désigne [*MeanPosAcc, TempsArrete, TempsFreinMoteur, PKE, FreinageParKm*] et où la fonction logit est définie par : $logit(p) = \frac{p}{1-p}$

Le coefficient R^2 de ce modèle est égal à 0.608, ce qui signifie que 60,8% de la variabilité de la variable réponse Y est expliqué par le modèle, avec une forte influence de la variable PKE. Ainsi la probabilité d'être en éco-conduite baisse fortement dès que la variable PKE augmente. Le tableau 2 indique la proportion de trajets bien classés et mal classés par le modèle.

Tableau 2 – Table de classification pour un seuil de 0.5

Valeur observée	Valeur prédite		
Fréquence	0	1	Total
0	19	2	21
1	2	19	21
Total	21	21	42

Pour un seuil de 0.5, le pourcentage de trajets bien classés est de 90.5%. Cependant, il est important de noter qu'ici le modèle a été construit à partir de toutes les observations, ce qui peut biaiser les résultats. Une méthode de validation croisée dite « leave-one-out » (option CTABLE de la procédure LOGISTIC de SAS®) a donc été utilisée. Pour un seuil toujours égal à 0.5, le pourcentage de trajets bien classés est alors de 85.7%, ce qui est proche du résultat précédent et laisse donc à penser que le modèle obtenu est suffisamment robuste.

Ce premier modèle propose un indicateur que l'on peut prédire à l'aide de cinq paramètres. Il est donc aussi possible d'en déduire des modifications de ces paramètres permettant d'améliorer l'indicateur final. D'autre part, ce modèle logistique a montré la forte influence de la variable PKE qui ne dépend que de la vitesse et de l'accélération. Il semble donc intéressant de développer une variante plus simple de notre indicateur, utilisable lorsque peu d'informations sont disponibles (cas des smartphones donnant uniquement la position et la vitesse). C'est pourquoi un second modèle logistique basé uniquement sur la variable PKE a été construit :

$$Logit\ [\ P\ [Trajet = Eco \mid PKE\ ] = 9.910 - 34.558 \times PKE \qquad (3)$$

Le coefficient R^2 est égal à 0.465 et le pourcentage de trajets bien classés pour un seuil de 0.5 est de 83.3%. Ce modèle est moins précis que le premier, mais il possède l'avantage de pouvoir être calculé très facilement et donc intégré sur des plateformes communicantes, indépendantes du véhicule.

5.2 Création d'un "eco-index" : vers la conception d'un système d'aide à l'éco-conduite

Afin d'obtenir un indicateur aisément compréhensible, la probabilité d'être en situation d'éco-conduite issue du modèle logistique à cinq variables explicatives a été convertie en un nombre compris entre 0 et 100. Ce nombre, appelé "eco-index", est calculé à partir de l'ensemble du trajet, et constitue donc un indicateur global. Or, l'objectif de cette étude est de concevoir un système d'aide à l'éco-conduite permettant au conducteur de s'auto-évaluer au cours du trajet. Il est donc nécessaire de renvoyer au conducteur des informations relatives à sa conduite tout au long du trajet. Partant de l'hypothèse que cet indicateur restait valable sur un intervalle de temps réduit, nous avons testé la possibilité de le calculer toutes les cinq secondes en se basant sur les trois dernières minutes de la conduite. Cette version dynamique permet donc de capter les petites variations de conduite, et ainsi de permettre au conducteur d'évaluer lui-même l'impact de ses actions. La figure 2 (a) représente l'évolution de l'éco-index au cours de deux trajets ("Normal" et "Eco") pour un même conducteur. Au cours du trajet effectué en conduite économique, on distingue clairement deux chutes de l'éco-index : la première correspondant au franchissement d'un rond-point avec suivi de véhicules, et la deuxième correspondant à un arrêt au stop. En conduite « normale » l'éco-index est moins élevé, et

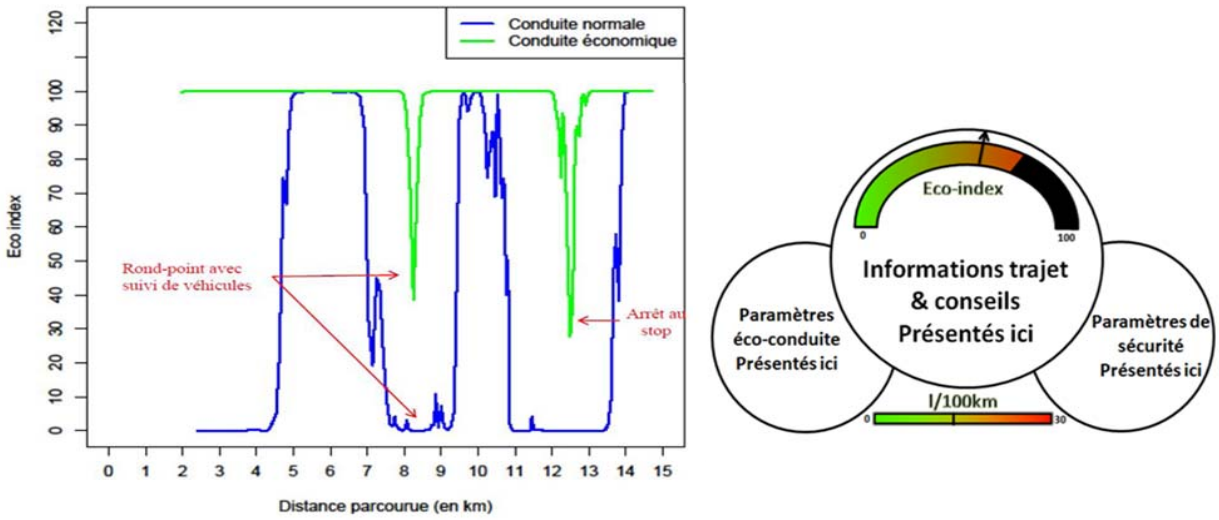


Figure 2 - (a) Evolution de l'éco-index d'un même conducteur selon les deux types de conduite. (b) Prototype d'interface Homme/Machine de type EDAS.

Caractérise donc bien la différence de conduite. On peut constater l'influence de l'infrastructure qui peut contraindre à une conduite fortement consommatrice (arrêts fréquents, ralentissements etc.). Cette approche demande à être validée et testée expérimentalement à l'aide d'une interface Homme-Machine adaptée (Figure 2 (b)).

6. Conclusion

La mise au point d'un système d'aide à la conduite est souvent difficile en termes d'ergonomie, de simplicité et d'efficacité. Il est en effet important de résumer l'information nécessaire à une conduite complexe avec peu de paramètres compréhensibles et utilisables par le conducteur. Cela est généralement effectué en agissant sur la vitesse, par le biais de systèmes qui cherchent à renvoyer une vitesse de consigne au conducteur, celle-ci dépendant soit d'un niveau de risque « contrôlé », soit de conditions de conduites modifiées (météorologiques ou dues à des limitations par ex.). L'impact de ce genre de systèmes sur la consommation (ACC, ISA, Speed Regulation Systems) est encore mal connu et semble peu efficace. D'autres approches utilisent des informations dynamiques sur le trafic environnant pour réduire les bouchons sur autoroute (Barth & Boriboonsomsin (2009)). Ces aides à la conduite sont de type ISA en version adaptative, mais constituent ce qui se rapproche le plus d'un système de type EDAS. Il faut noter qu'une tentative de construction d'une EDAS a déjà eu lieu en France (cf Barbé et al. 2007) lors du projet GERICO (ANR), et a été testé sur un unique trajet avec toutefois de très bon résultats. Le domaine de recherche semble donc à la fois prometteur et ouvert.

L'objectif des travaux présentés ici était de construire un indicateur agrégé, intégrant différentes informations de conduite comme le régime moteur, l'accélération, ou le nombre de freinages. L'usage de modèles probabilistes associés à une expérience adaptée a permis de construire un indicateur capable de classer efficacement des trajets en termes d'efficacité énergétique. L'indicateur a été validé à l'échelle d'un seul trajet, et d'autres expériences seront certainement nécessaires pour améliorer l'approche sur d'autres types de routes (milieu urbain notamment). Il apparaît tout de même un intérêt certain à disposer d'un indicateur aisément calculable, ne nécessitant pas l'information de consommation de carburant, et capable de caractériser l'efficacité énergétique du comportement de conduite. La version dynamique proposée semble en outre de nature à constituer une information à la fois simple, pertinente et synthétique. Plusieurs travaux récents s'intéressent aux interfaces Homme/Machine (IHM) d'aides à la conduite permettant de tenir compte de l'efficacité énergétique (Barbé et Boy (2008) par exemple). On sait maintenant que ces prototypes d'interfaces sont d'autant plus efficaces et appréciées qu'elles sont simples et claires (Young et al. (2009) ou Van der Voort et al. (2001)). L'indicateur dynamique proposé dans ce travail a donc été construit dans le but de constituer un élément central d'une interface de type EDAS (cf Figure 2 (b)), destiné à compléter l'information de consommation instantanée.

Les travaux présentés ici ont été effectués au LIVIC dans le cadre d'une recherche libre. Ils se poursuivront dans le cadre d'une collaboration INRETS/LCPC autour de l'opération de recherche SERRE/VERONESE destinée à regrouper les recherches effectuées dans le cadre du Grenelle de l'environnement. Un consortium regroupant les laboratoires LTE, LEPSIS, LESCOT et LIVIC, ainsi que le CETE NC et le CETE SO est déjà en place. La suite des travaux verra se confronter différentes approches concurrentes pour la proposition d'une EDAS qui devraient être testées en conditions réelles dans les années qui viennent. La collecte de données en milieux urbains et autoroutiers devrait aussi se poursuivre afin d'améliorer nos connaissances et d'explorer les liens existants entre la conduite économique et les différentes infrastructures.

Références

- Barbé, G., Boy, J., and Sans, M. (2007), "Gerico : A human centered eco-driving system," in Proc. Int. Conf. 10th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems, Seoul, Korea, September.
- Barbé, J., and Boy, G. (2008), "Analysis and modelling methods for the design and evaluation of an eco-driving system", in Tools and methodologies for ITS design and drivers awareness, HUMANIST conference, Lyon.
- Barth, M., and Boriboonsomsin, K. (2009), "Energy and emissions impacts of a freeway-based dynamic eco-driving system," Transportation Research Part D, vol. 14, pp. 400–410.
- Beusen, B., Broekx, S., Denys, T., Beckx, C., Degraeuwe, B., Gijsbers, M., Scheepers, K., Govaerts, L., Torfs, R. and Int Panis, L. (2009), "Using on-board logging devices to study the longer-term impact of an eco-driving course", Transportation Research Part D : Transport and Environment, vol. 14, issue 7, pp. 514–520.
- Carsten, O., Lai, F., Chorlton, K., Goodman, P., Carslaw, D. and Hess, S. (2008), "Speed limit adherence and its effect on road safety and climate change", University of Leeds, Tech. Rep.
- CIECA (2007) (International commission for driver testing authorities), Projet interne de la CIECA concernant l'intégration de l'éco-conduite dans la formation et l'examen des conducteurs de catégorie B, http ://www.cieca.be/, Ed. CIECA.
- Ericsson, E. (2001), "Independent driving pattern factors and their influence on fuel-use and exhaust emission factors," Transportation Research Part D : Transport and Environment, vol. 6, pp. 325–345.
- Johansson, H., Färnlund, J., Engström, C. (1999), "Impact of EcoDriving on emissions and fuel consumption", Vägverket: Publikation 165E (Swedish Road Administration: Publication 165E).
- Larsson, H. and Ericsson, E. (2009), "The effects of an acceleration advisory tool in vehicles for reduced fuel consumption and emissions," Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 14, pp. 141–146.
- Regan, M.A., Triggs, T.J., Young, K.L., Tomasevic, N., Mitsopoulos, E., Stephan, E. and Tingvall, C. (2006), "On road evaluation of intelligent speed adaptation, following distance warning and seatbelt reminder systems : Final results of the tac safecar project.", Monash University, Tech. Rep.
- Saint-Pierre, G., and Ehrlich, J. (2008), "Impact of intelligent speed adaptation systems on fuel consumption and driver behaviour", in Proceedings of 15th ITS World Congress.
- van der Voort, M., Dougherty, M., and van Maarsevee, M. (2001), "A prototype fuel-efficiency support tool," Transportation Research Part C : Emerging Technologies, vol. 9, pp. 279–296.
- Vermeulen, R. (2006), "The effects of a range of measures to reduce the tail pipe emissions and/or the fuel consumption of modern passenger cars on petrol and diesel", TNO science and industry, Tech. Rep.
- Young, M.S., Birrell, S.A., and Stanton, N.A. (2009), "Lecture Notes in Computer Science : Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics", Springer Berlin/Heidelberg, ch. "Design for Smart Driving : A Tale of Two Interfaces", pp. 477–485.

DEVELOPPEMENT D'UN SYSTEME DE DETECTION DE QUASI-ACCIDENTS EN CARREFOUR

P. SUBIRATS **E. VIOLETTE**
CETE Normandie-Centre, ERA34
Rouen, France

F. CONCHE
CETE de Lyon
ERA 12
Clermont-Ferrand, France

D. DOUCET **G. DUPRE**
CETE Normandie-Centre, ERA34
Rouen, France

Résumé
Sur route interurbaine, un accident corporel sur 10 se produit en intersection**.** Les intersections représentent moins de 1% du linéaire parcouru par les usagers, mais plus de 10 % des accidents. Le danger que représentent les intersections se traduit par une pression sociale forte pour sécuriser ces sites. Dans cet article, nous présentons deux systèmes d'analyse de la sécurité d'un carrefour. Le premier est fondé sur une détection par traitement d'images. Le deuxième est développé à partir de capteurs physiques d'analyse du trafic. Les systèmes développés ont pour but de comprendre les dysfonctionnements dans une intersection, d'évaluer l'efficacité sur la sécurité des contre mesures implantées. Ils détectent et enregistrent les conflits liés aux usagers venant de la route non prioritaire et coupant la route de l'usager prioritaire en mouvement direct. L'objectif final est de proposer et de définir un indicateur de sécurité d'un carrefour.

Mots-clés: sécurité, aménagement, carrefours, quasi-accident, indicateur, gestionnaire routier

Abstract
On rural roads, one injury accident in 10 occurs in intersections. Intersections represent less than 1% of linear length traveled by users, but over 10% of accidents. In this article we present two crossroad safety analysis systems. The first system is based on detection by image processing. The second is developed from physical sensors for traffic analysis. These systems were developed to understand intersection dysfunctions, and to evaluate the effectiveness of new facilities. They detect and record conflicts associated to users of a non-priority road cutting a user driving on the priority road. The final goal is to define a safety indicator of a crossroads.

Keywords: safety, facility, intersections, near-miss accident, indicator, road manager

1. Contexte et analyse du besoin

1.1 Un fort enjeu

Sur route interurbaine, 1 accident corporel sur 10 se produit en intersection. Après une forte diminution en 2004, le nombre d'accidents en intersection sur route interurbaine reste constant, alors que l'ensemble des accidents diminue. Les conducteurs âgés étant particulièrement représentés dans ces accidents, les accidents en carrefour devraient augmenter, suite au vieillissement de la population.

1.2 Un fort risque

Les intersections représentent moins de 1% du linéaire parcouru par les usagers, mais plus de 10 % des accidents. Le risque d'accident pour un usager circulant sur une route interurbaine est multiplié par 10 dans une intersection.

1.3 La demande des gestionnaires

Comprendre
Le danger que représentent les intersections, se traduit par une pression sociale forte pour sécuriser ces sites. L'aménagement passe par un diagnostic de sécurité dont le but est de comprendre les déroulements des accidents. Cependant, les accidents corporels sur une intersection donnée sont peu nombreux, et souvent le procès verbal d'accident est peu renseigné car l'audition de l'usager de la route secondaire ne figure pas dans le procès verbal en raison de la gravité de ses blessures. Le gestionnaire routier manque donc de données pour comprendre la problématique du site.

Évaluer
Les gestionnaires souhaitent mesurer rapidement l'efficacité d'une modification de l'infrastructure, de l'amélioration des équipements ou de la modification de l'environnement. Sur ce type de site, le recensement des accidents nécessite un recul de 3 à 5 ans environ pour déterminer l'efficacité d'une modification. Ce délai ne correspond ni aux attentes des gestionnaires, ni à celles des élus et des usagers.

Afin d'offrir un très bon niveau de sécurité, les gestionnaires mettent en place des aménagements innovants : carrefour chicane, effet de paroi, signalisation dynamique d'alerte, mini rond point rural, etc. Les gestionnaires souhaitent ainsi évaluer rapidement ces innovations.

1.4 Objectifs

Les systèmes présentés ci-après ont pour but de comprendre les dysfonctionnements dans une intersection et d'évaluer l'efficacité sur la sécurité des contre mesures implantées. Ils détectent et enregistrent les conflits liés aux usagers venant de la route non prioritaire et coupant la route de l'usager prioritaire en mouvement direct. Ce type de conflit engendre le principal type d'accidents : ce sont les accidents de cisaillement.

Le système final détecte des situations qui se rapprochent du concept de conflit de trafic défini par Amunndson en 1977. Un conflit de trafic (parfois nommé quasi accident) est *« une situation observable, au cours de laquelle au moins deux usagers de la route approchent l'un de l'autre dans le temps et dans l'espace, jusqu'à un point tel qu'il y a risque d'accident si leurs mouvements demeurent inchangés »*.

Ainsi, le système détecte des situations où deux usagers approchent l'un de l'autre sans changer leur trajectoire. Le système a été développé pour fonctionner en milieu inter urbain où la technique classique des conflits de trafic n'est pas appliquée en raison du temps d'observation nécessaire (faible trafic).

2. Système fondé sur une analyse par traitement d'images

2.1 Principe

Le logiciel Autoscope

Le logiciel utilisé pour l'analyse est le logiciel Autoscope. Il permet de positionner à l'écran des capteurs virtuels qui détectent des changements des pixels les composant.
Ces capteurs peuvent être :

- de position : ils détectent le passage d'un véhicule
- de direction : ils détectent le passage d'un véhicule dans une direction donnée
- de vitesse : ils mesurent la vitesse moyenne d'un véhicule entre 2 points (nécessité de connaître la distance entre ces 2 points)

L'horodate de changement d'état des capteurs ainsi que leur état sont enregistrés dans un fichier texte.

Schéma des capteurs utilisés

Des premiers essais ont montré que les capteurs de vitesse et de direction sont moins fiables que les capteurs de position. En conséquence, seuls des capteurs de position ont été utilisés et positionnés comme indiqué sur la figure 1.

Figure 1 - positionnement des capteurs

Pour qu'un cisaillement soit détecté, les étapes suivantes doivent être réalisées :

(a) un véhicule de la voie secondaire dépasse la ligne de stop (*stop_1* puis *stop_2* s'éteignent dans un certain intervalle de temps)
(b) un véhicule arrive sur la voie principale au niveau du stop dans un certain délai après le démarrage du véhicule au stop (*vp_2* s'allume « juste après » *vp_1*, et ceci « juste après » l'étape précédente)

Le temps au cisaillement est alors le temps écoulé entre le moment où le capteur *stop_2* s'éteint et le moment où le capteur *vp_2* s'éteint. Pour évaluer le principe et avoir un

échantillon de données suffisamment important, les cisaillements à moins de 20 secondes sont recherchés, bien que cette durée ne soit pas réaliste dans le cadre d'une évaluation de sécurité (un temps de 3 à 4 secondes serait préférable).

La détection des cisaillements et le calcul du temps au cisaillement sont réalisés par un programme sous Visual Basic. Le logiciel AUTOSCOPE a ainsi été évalué à partir de 2 échantillons d'images issus de sites distincts.

2.2 Résultats sur un premier site

Le site
Le carrefour est situé dans le Calvados, à l'intersection de la RD 579 avec les RD 51 et 280a. Il s'agit d'un carrefour à 4 branches, de 15 m de large, équipé de voies de tourne-à-gauche et d'une voie de tourne-à-droite vers la RD 51. Le trafic est de 13 300 véh/j sur la voie principale et d'environ 1 500 véh/j sur les voies secondaires.

Les cisaillements détectés
Les résultats obtenus à partir de 2h50 de vidéo (fin d'après-midi en septembre) sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 1 – Résultats sur un premier site

Cisaillements à moins de 20 s détectés	283
Dont cisaillements réels	*68*
Dont fausses alertes	*215*
Cisaillements à moins de 20 s non détectés	64

On peut ainsi calculer les indicateurs suivants :
- taux de détection (pourcentage de cisaillements réels détectés) = 52 %
- taux d'erreur (pourcentage de fausses alertes) = 76 %

Les cisaillements non détectés et les fausses alertes
Les fausses alertes sont dues en quasi totalité à un déclenchement intempestif des capteurs au niveau du stop sur la voie secondaire suite au passage soit d'un véhicule large, soit d'un véhicule léger dont l'ombre atteint les capteurs (après 16h). Le nombre de ce type de fausse alerte pourrait être réduit en reculant les capteurs au niveau du stop, ce qui nécessiterait un autre angle de prise de vue et ce qui risquerait d'affecter la détection des véhicules venant de la voie secondaire (le capteur *stop_1* ne doit pas s'éteindre avant le franchissement du stop et doit donc être suffisamment proche de la ligne de stop).

Dans 90 % des cisaillements non détectés, l'usager en provenance du stop tourne à droite et n'est pas détecté. Ceci s'explique par l'impossibilité de placer les capteurs suffisamment près du bord de l'écran pour qu'ils couvrent toute la largeur visible de la voie secondaire et par l'angle de vue qui ne permet pas de voir l'extrémité droite de la ligne de stop.

2.3 Résultats sur un deuxième site

Le site
Un deuxième site a fait l'objet de prises de vue, avec un angle plus important, grâce à une caméra sur un mât d'éclairage de grande hauteur situé juste au niveau de l'intersection. Ce carrefour est situé en Seine-maritime, à l'intersection de la RD 490 et de la RD 37a. Il s'agit

d'un carrefour à 3 branches, avec une voie de tourne-à-gauche et une voie de tourne-à-droite. Le trafic est d'environ 10 000 véh/j sur la voie principale (8% de PL) et 6 500 véh/j sur la voie secondaire.

Les cisaillements détectés
Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 2 – Résultats sur un deuxième site

Cisaillements à moins de 20 s détectés	288
Dont cisaillements réels	*263*
Dont fausses alertes	*25*
Cisaillements à moins de 20 s non détectés	96

Les indicateurs prennent alors les valeurs suivantes :
- taux de détection = 73 %
- taux d'erreur = 9 %

Ces résultats sont bien meilleurs que ceux obtenus pour le premier site.

Les cisaillements non détectés et les fausses alertes
La moitié des cisaillements non détectés sont dus à un long arrêt au stop. En effet, lorsqu'un capteur reste activé « longtemps » (valeur paramétrable) sans changement des pixels le composant, le logiciel considère que l'image de fond devient l'image de référence. Le capteur s'active ensuite lorsque l'image change, c'est-à-dire lorsque le véhicule démarre. Le capteur est alors « déphasé ».

Les autres non-détections ainsi que les fausses alertes ont plusieurs causes : le faisceau des phares d'un véhicule déclenche les capteurs de façon intempestive, une vitesse faible / une interdistance faible / un mouvement de tourne-à-gauche / un arrêt trop en amont du stop conduisent à une séquence d'activation des capteurs ne permettant pas de détecter les cisaillements.

Des essais ont montré qu'un changement des paramètres modifiables (temps de rafraîchissement des capteurs, intervalle de temps maximum entre la désactivation des capteurs d'une même voie pour considérer qu'un véhicule est passé) n'améliore pas les résultats. Les résultats sont légèrement améliorés en supprimant les périodes de nuit.

2.4 Synthèse des résultats

Dans des configurations « normales », comme le 1er site, les résultats sont insuffisants. Les problèmes suivants ont été rencontrés :
- un angle de prise de vue ne permettant de voir la totalité du carrefour (caméra trop basse et/ou trop éloignée du carrefour)
- des capteurs activés par des ombres, des faisceaux de lumière des phares
- des masques causés par des véhicules sur la voie la plus proche de la caméra alors que l'on observe la seconde voie
- un système qui ne fonctionne pas de nuit ni par temps de pluie à cause des reflets de phare ni par temps de brouillard (conditions météo dégradées)

Le logiciel utilisé n'est pas satisfaisant pour l'application visée. D'autres systèmes de détection seraient probablement plus appropriés.

En effet, lorsque la configuration du site est « idéale » (caméra en hauteur, au droit du carrefour) et de jour, les résultats obtenus sont satisfaisants. Malheureusement, les sites « idéaux » sont peu nombreux. Les principales limitations du système sont dues à l'utilisation de vidéos et d'un logiciel de traitement d'images et pourraient être supprimées en utilisant des capteurs physiques, tout en conservant la même logique de positionnement des capteurs et de traitement des données. C'est l'objectif du système décrit ci-après.

3. Système développé à partir de capteurs physiques

3.1 Principe du système

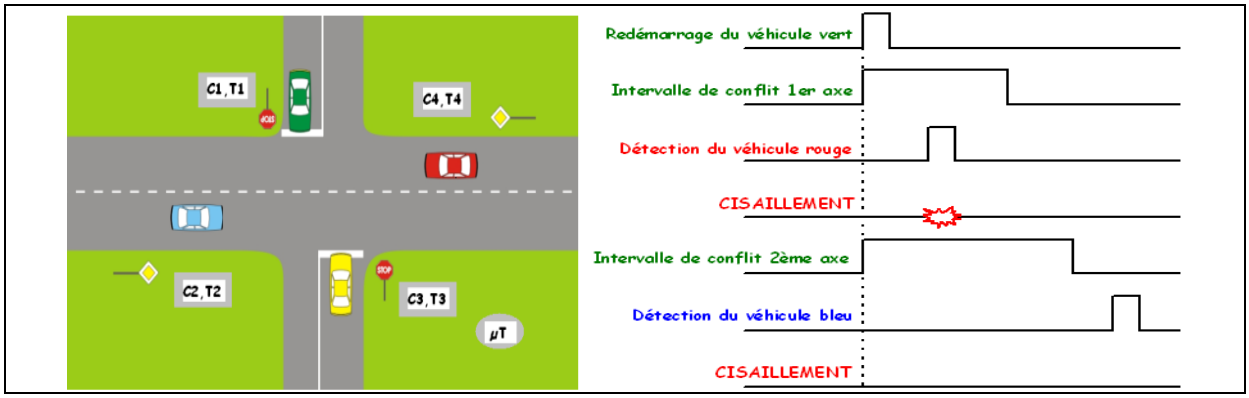


Figure 2 - Principe de fonctionnement du système

La figure 2 illustre le principe de fonctionnement du système. Dès qu'un véhicule non prioritaire (véhicule vert ou jaune) démarre et s'engage dans l'intersection, deux intervalles temporels de conflits (intervalle de conflit premier axe et intervalle de conflit deuxième axe) sont activés. Si un véhicule prioritaire est détecté durant ces intervalles, on est en présence d'un *cisaillement*. Le temps à la collision entre un véhicule prioritaire et un véhicule non prioritaire est défini comme étant la différence de temps entre l'instant où le redémarrage d'un véhicule non prioritaire est détecté et l'instant où un véhicule prioritaire est détecté dans un de ces intervalles.

Par exemple sur la figure 2, on peut voir sur les chronogrammes que le véhicule non prioritaire vert aborde l'intersection et que deux véhicules prioritaires (véhicule rouge et véhicule bleu) ont été détectés ; toutefois un seul véhicule prioritaire (véhicule rouge) est détecté dans un des intervalles prédéfinis ce qui entraîne un conflit de cisaillement.

Sur la figure 2, (C1, T1), (C2, T2), (C3, T3) et (C4, T4) constituent des couples capteurs et émetteurs. Le sigle µT représente l'unité de traitement des données issues des différents couples capteurs et émetteurs. Les capteurs C1 et C3 doivent détecter la présence des véhicules circulant sur les voies non prioritaires redémarrant après le stop tandis que les capteurs C2 et C4 doivent détecter les véhicules circulant sur les voies prioritaires.

T1, T2, T3, T4 doivent transmettre au moyen d'une liaison sans fil ces informations à l'unité de traitement. La transmission de ces informations utilise une technologie sans fil pour éviter des travaux de génie civil et pour des raisons de transportabilité.

Définition de l'intervalle de conflit

Si l'on considère le cas défavorable suivant :

- le véhicule circulant sur la voie principale est détecté grâce au capteur C_1 situé 100 mètres environ avant l'intersection,
- le véhicule roulant sur la voie principale a une vitesse de 100 km/h,
- le véhicule roulant sur la voie principale ne ralentit pas,
- le véhicule roulant sur la principale et le véhicules démarrant de la voie secondaire ne modifient pas leur trajectoire,

Dans cette situation, il faudra alors 3.5 secondes au véhicule de la voie principale pour atteindre le point de conflit (c'est-à-dire l'endroit où le cisaillement entre deux véhicules est possible). Nous jugeons alors que si l'intervalle de conflit est inférieur à 4 secondes alors nous serons en situation d'accident, si l'intervalle est inférieur à 5 secondes nous sommes en situation de quasi-accident. Au-delà de 6 secondes, l'usager de la voie secondaire aura le temps de franchir le carrefour sans danger.

Afin de conforter ce raisonnement, nous pouvons nous appuyer sur les instructions données dans le guide SETRA « aménagement des carrefours interurbains » (1998). Ce guide précise que dans le cas d'un carrefour à stop situé sur une route bidirectionnelle à deux voies, il faut un temps minimum absolu de 6 secondes pour franchir le carrefour. Le temps conseillé pour franchir le carrefour est de 8 secondes.

Cet intervalle de conflit est ajusté sur le terrain, en fonction de la nature du carrefour et de l'emplacement du capteur C_1.

3.2 Le système développé

Figure 3 - Illustration du système développé. A gauche : l'unité centrale associée à un système d'enregistrement. A droite, en haut les boitiers de détection des véhicules non prioritaires, en bas les boitiers de détection des véhicules prioritaire.

La figure 3 illustre le système développé à partir de capteurs physiques. Les véhicules prioritaires sont détectés au moyen de radar doppler qui délivrent la vitesse des véhicules. La mesure de la vitesse a été privilégiée à la détection du simple passage car elle permet de filtrer les faibles vitesses caractéristiques d'un mouvement de tourne à droite. En effet, les véhicules effectuant un mouvement de tourne à droite n'entrent pas en conflit avec les véhicules redémarrant des voies secondaires. La valeur de la vitesse est transmise à l'unité centrale grâce à des émetteurs wifi. Une illustration de ces boîtiers est présentée figure 3 à droite en bas.

La détection des véhicules redémarrant au stop sur les voies secondaires se fait au moyen de tubes pneumatiques. L'événement « redémarrage au stop » est transmis à l'unité centrale grâce à un émetteur radio. Une illustration des boîtiers développés est donnée figure 3 en haut à droite.

L'unité centrale, illustrée figure 3 à gauche, est composée d'un ordinateur industriel associé à des récepteurs wifi et radio ainsi que d'un système d'enregistrement vidéo d'événements qui enregistre les conflits de trafic 30 secondes avant et 15 secondes après l'événement. On dispose ainsi pour chaque événement détecté d'une séquence vidéo qui est utilisée pour valider la pertinence de l'événement détecté d'une part, et qui permet une analyse qualitative de l'événement d'autre part. Le système ainsi développé peut fonctionner de manière autonome durant une semaine en continu.

3.3 Résultats

A l'heure actuelle, le système a été implanté sur trois carrefours afin de finaliser son développement. La figure 4 illustre un exemple de situation de cisaillement détectée avec le système développé. Le véhicule venant de droite au stop démarre rapidement et entre sur la voie principale afin de s'insérer avant le passage d'un tracteur (masqué en haut à gauche). Sur la vidéo, on observe que le véhicule arrivant sur la voie principale a du freiner fortement et modifie légèrement sa trajectoire afin d'éviter la collision.

Figure 4 - Exemple de résultats obtenus avec le sytème développé au moyen de capteurs physiques

4. Définition d'un indice de risque en carrefour

Nous proposons dans cette partie de définir un indice de risque en carrefour.

L'indice proposé est égal au nombre de conflits pondérés par la gravité du conflit enregistré sur une période donnée. Nous avons choisi de prendre le nombre de conflits par heure.

La pondération des conflits se définit comme suit : la gravité d'un conflit dépend de la vitesse du véhicule et du temps théorique à la collision.

$$\mathbf{G} = KV^2 \frac{1}{T}$$

T = temps entre les 2 véhicules au point de conflit
V = vitesse de l'usager sur la route prioritaire. On prend le carré de la vitesse car la gravité d'un choc est fonction du carré de la vitesse au moment du choc.

Le poids calculé ci-dessus se rapproche de la méthode utilisée en Suède concernant les quasi-accidents.

L'indice calculé peut être borné par des limites hautes et basses en appliquant la loi de poisson au nombre de conflits.

Cet indice permet :

- de mesurer l'effet d'une intervention sur l'infrastructure par comparaison avant et après aménagement. Par exemple une intersection qui aurait un indice divisé par 2 après intervention sur l'infrastructure verrait son niveau de sécurité amélioré de 50% ;
- de comparer entre elles, plusieurs intersections ou plusieurs types d'intersections. Par exemple, sur un itinéraire les intersections les plus dangereuses seront celles ayant les plus forts indices de risque ;
- d'estimer le nombre d'accidents prévisible sur une intersection. Cette estimation pourra être réalisée après avoir établi la corrélation nombre d'accident en fonction de l'indice de risque suite au déploiement sur plusieurs sites du système.

5. Conclusion et perspectives

Dans cet article, nous avons présenté deux systèmes d'analyse du niveau de sécurité d'un carrefour. Le premier système fondé sur une analyse vidéo a été rapidement écarté car il nécessitait des conditions d'acquisition vidéo incompatibles avec les caractéristiques générales des intersections de rase campagne.

Un second système fondé sur l'utilisation de capteurs d'analyse de trafic a été proposé. Ce système doit encore faire l'objet de validation sur différents types de carrefour avant d'être entièrement opérationnel et utilisable par les gestionnaires routiers.

En particulier, il reste à valider l'indice de sécurité présenté dans la partie 4 de cet article comme indicateur d'accidents et établir une corrélation entre indice de sécurité et accidents.

Le système de détection de conflit de trafic pourra être utilisé pour :

- Établir un diagnostic de sécurité sur une intersection sur route interurbaine. Il peut contribuer à affiner l'analyse faite à partir des procès verbaux d'accidents établis par les forces de l'ordre. Il peut être également appliqué lorsque les données relatives aux accidents sont manquantes.
- Évaluer l'impact sur la sécurité d'une intervention sur l'infrastructure, les équipements ou l'environnement. L'évaluation ne nécessite pas d'attendre plusieurs années. Elle peut être réalisée dans les semaines qui suivent les modifications de l'infrastructure. Cette évaluation nécessite l'observation des conflits de cisaillement avant et après aménagement.
- Évaluer le niveau de sécurité d'une intersection ou d'un type d'intersection.

En perspective des travaux présentés dans cet article, il pourrait être envisagé de modifier le système afin de prendre en compte les mouvements de tourne à gauche de la route principale vers la voie secondaire. En effet, ces mouvements sont la seconde principale cause d'accident survenant sur les intersections de rase campagne.

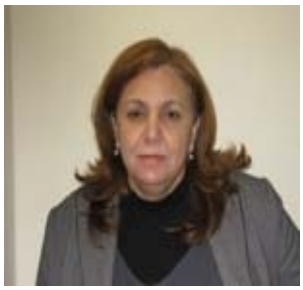
Remerciements

Les travaux présentés dans ce papier ont été réalisés dans le cadre du thème RADARR du projet SARI, action concertée du PREDIT. Ils ont été financés par la Direction de Sécurité et de la Circulation Routière.

Références

- AIPCR (2003), « Manuel de sécurité routière ».
- Conche, F., et al. (2009), « Sécurité des carrefours plans sur routes principales», LCPC, Opération de recherche Risques Routiers.
- Muhlrad, N.. (1988), « Technique des conflits de trafic. Manuel de l'utilisateur » Synthèse INRETS n° 11.
- ONISR (2009), « La sécurité routière en France : bilan de l'année 2008 », La Documentation Française.
- Picado-Santos, Rodrigues (1998), "The Application of Traffic Conflict techniques in validation of low cost safety Improvement Measures".
- SETRA, CETE Normandie-Centre (2001), « Typologie des accidents en intersection sur routes interurbaines ».
- Violette, E., Voisin, M. (2005), « Projet RADARR : Analyse des trajectoires en carrefour », CETE Normandie-Centre.
- SETRA (1998), « Aménagement des carrefours interurbains ».

VIVRE2 - VEHICULES INDUSTRIELS ET USAGERS VULNERABLES DE LA ROUTE



Zohra ROISSAC
Chef de projets
Transport Urbain
RENAULT Trucks
Lyon, France

H. TATTEGRAIN
Chargée de Recherches
INRETS-LESCOT
Lyon, France

A. MAINCENT
Ingénieure de recherche
CRIS/LEACM
Université Lyon1
Lyon, France

R. LABAYRADE
Enseignant/chercheur
DGCB-CNRS
ENTPE
Lyon, France

Résumé

Cet article décrit le travail pluridisciplinaire réalisé dans le cadre du projet VIVRE2 pour la prévention et la réduction des accidents entre usagers vulnérables et véhicules industriels en ville. Une démarche systémique a été développée, prenant en compte la problématique de la sécurité des usagers vulnérables dans sa globalité en intégrant les facteurs contextuels, humains et technologiques. L'objectif du projet étant l'étude et l'évaluation expérimentale de solutions technologiques à implanter sur les véhicules pour réduire significativement le nombre de ces accidents. L'analyse du contexte de survenue des accidents a permis d'identifier les attentes des conducteurs en matière d'assistance à la conduite et de définir les solutions technologiques de détection et d'alerte. La problématique de l'éclairage et de la visibilité du véhicule par les usagers vulnérables a été aussi abordée dans ce projet. Les solutions retenues ont été évaluées à l'aide de simulations numériques 3D pour la lumière et sur simulateur dynamique de conduite de camion pour les alertes et les stratégies d'assistance.

Mots-clés: Usager vulnérable, Camion, accident sécurité, psychologie, assistance à la conduite, visibilité, simulateur de conduite.

Abstract

This paper describes the multidisciplinary work realized within the framework of the project VIVRE2 for the prevention and the reduction of the accidents between vulnerable road users and industrial vehicles in urban area. A systematic approach was developed, taking into account the problem of vulnerable road user's safety in its entirety by integrating contextual human and technological factors. The objective of the project has been the analysis and the experimental evaluation of technological solutions to be implanted on vehicles to reduce significantly the number of accidents. The analysis of the arisen context of accidents allowed to identify the expectations of drivers concerning driving assistance with the driving and to define detection devices and alert solutions. Lighting and visibility issues of the vehicle by the vulnerable user were also approached in this project. Selected solutions were estimated by 3D numeric simulations for lighting and on a dynamic truck driving simulator for alerts and assistance strategies.

Keywords Vulnerable road user, Truck, Accident, Safety, Psychology, Driving assistance, Visibility, Driving simulator.

1. Introduction

L'activité de livraison est un élément majeur au sein du transport routier de marchandises pour assurer le développement économique des villes. Le conducteur, ou chauffeur-livreur fait face à des tâches variées, à une pression temporelle constante et à un environnement extrêmement complexe et hostile qui engendrent un stress permanent et renforcent l'intérêt du développement de systèmes d'aide à la conduite. En sus des problèmes de visibilité des chauffeurs de poids lourds (angles morts plus importants que sur les véhicules légers), les mesures de restriction horaires d'accès des véhicules industriels ne sont pas suffisantes pour résoudre les conflits.

La présence du véhicule industriel (VI) de distribution participe à l'augmentation de la congestion en milieu urbain et devient particulièrement problématique en zone piétonne. La protection des usagers vulnérables est un enjeu de sécurité routière de plus en plus crucial : la majorité des accidents impliquant ces usagers et un camion en milieu urbain a des conséquences dramatiques, souvent mortelles pour l'usager vulnérable.

Le projet VIVRE2, subventionné en 2005 par l'ANR (Agence Nationale pour la Recherche) au titre du Groupe Opérationnel 4 du PREDIT et labellisé par le pôle de compétitivité LUTB 2015 (Lyon Urban Truck and Bus), s'est donc donné pour objectif l'étude de solutions technologiques pour réduire le nombre et la gravité des accidents impliquant des véhicules industriels et des usagers vulnérables en milieu urbain. L'introduction de solutions onéreuses s'avère difficile dans cette catégorie de véhicules car un prix faible est le critère d'achat prépondérant des transporteurs qui opèrent en ville. Le choix de solutions pertinentes et adaptées au contexte est donc nécessaire pour la diffusion de technologies innovantes.

Pour atteindre cet objectif, une collaboration pluridisciplinaire impliquant les sciences humaines et les sciences de l'ingénieur a été mise en œuvre. En effet, la conception d'un système d'assistance à la conduite est un processus complexe qui doit prendre en compte les dimensions humaines, technologiques et ergonomiques, et passe par des phases itératives d'analyse et de validation, et une démarche méthodologique variée : études en laboratoire, sur simulateur de conduite…. Le projet a duré de juin 2006 à juillet 2009 et a bénéficié d'une aide de 680K€ pour un coût global de l'ordre de 1646K€. Six partenaires font partie du consortium :

- Renault Trucks a coordonné le projet, enrichit les fonctionnalités du simulateur de conduite, et participé à l'intégration et la validation des solutions technologiques sur ce simulateur.
- Le CEESAR (Centre Européen d'Etude de Sécurité et d'Analyse des Risques) a travaillé sur une base de données des accidents VI/UVR et sur l'identification des conditions d'occurrence des accidents par la méthode des EDA (études détaillées d'accidents).
- Le LEACM (Laboratoire d'Etude et d'Analyse Des Comportements et des Modèles) de l'université Lyon 2 a travaillé sur l'analyse des comportements humains, d'un point de vue psychologique, ergonomique et cognitif et sur la spécification et l'évaluation des IHM (interfaces homme-machine) et stratégies d'assistance.
- l'ENTPE-LASH (Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Laboratoire des Sciences de l'Habitat) et la société INGELUX ont contribué à l'analyse des problématiques liées à l'éclairage.
- L'INRETS-LESCOT (Institut National de REcherche sur les Transport et leur Sécurité, Laboratoire d'Ergonomie et de Sciences COgnitives pour le Transport) s'est intéressé à

l'étude et à la simulation de technologies d'assistance pour la détection et la protection des usagers vulnérables autour du camion et a développé une méthodologie de conception et d'implémentation des systèmes sur simulateur basée sur les besoins des conducteurs.

Le déroulement des travaux du consortium du projet VIVRE2 a comporté trois étapes :
- analyses : accidentologie, conditions lumineuses accidentogènes, comportements, attitudes et représentations des usagers vulnérables face aux camions, analyses de l'activité des chauffeurs-livreurs en milieu urbain.
- conception : spécifications des situations critiques, réalisation d'un circuit urbain complexe pour le simulateur de conduite, conception des scenarii de simulation, méthode de caractérisation de capteurs pour répondre aux besoins ergonomiques d'un système d'assistance, méthodologie de conception, spécification des IHM et stratégies d'assistance, développement des systèmes à mettre sur simulateur, élaboration de solutions d'éclairage.
- évaluation : tests sur simulateur dynamique de conduite ; évaluation ergonomiques des IHM, évaluation et comparaison des stratégies d'assistance (systèmes informatifs et/ou actifs).

2. Approche scientifique et technique

La démarche originale de ce projet a permis de couvrir un cycle complet de recherche de solutions partant de l'analyse des besoins réels en termes de sécurité jusqu'à la mise en œuvre de solutions techniques et de leurs évaluations. Cette démarche a donc naturellement commencé par des analyses accidentologiques : conditions d'occurrences des accidents en milieu urbain, entre un véhicule industriel et un usager vulnérable, puis activité des conducteurs et de la représentation des situations critiques du point de vue de l'usager vulnérable afin de déterminer sa conscience du risque en présence de véhicule industriel.

Pour identifier et caractériser les conditions lumineuses jouant un rôle accidentogène, des diagnostics sur les lieux d'accidents, des recueils de ressentis subjectifs des chauffeurs-livreurs et des mesures quantitatives (luminosité, relevés géométriques et photométriques sur le terrain) ont été faits. Une situation d'accident permettant de rendre compte des différents points de vue des usagers mis en cause a été modélisée en 3D. Des solutions lumineuses additionnelles à installer sur les véhicules industriels, pour éviter l'accident ou en réduire la gravité, ont été simulées et proposées. La prise en compte des points de vue de tous les protagonistes permet d'avoir une vue systémique des problèmes et d'étudier des solutions pour chacun : (i) système d'assistance pour le chauffeur de poids lourds, (ii) solutions d'éclairage pour aider l'usager vulnérable à mieux anticiper les manœuvres des camions.

La conception du système d'assistance au conducteur sur simulateur de conduite a nécessité une méthode de sélection et de caractérisation de capteurs répondant aux besoins identifiés par les analyses de l'activité. Les outils développés couvrent aussi la plateforme d'intégration dans le simulateur, la spécification des IHM et les stratégies d'assistance (incluant les modules de capteurs).

3. Etude accidentologique

L'état des lieux des accidents de la route entre VI et usagers vulnérables a permis d'identifier les données et informations utiles à une meilleure connaissance (conditions d'occurrence et typologie) de ces accidents, des principaux comportements accidentogènes chez les chauffeurs de poids lourds et par conséquent des systèmes et des solutions à mettre en œuvre pour réduire le bilan de ces accidents.

- L'analyse des dossiers d'accident entre un camion et un usager vulnérable (base de données générale Renault-Trucks/Ceesar) a permis de sélectionner quelques cas représentatifs et d'élaborer des fiches synthétiques de compréhension de l'accidentologie par un choix d'exemples concrets relatifs à chaque partenaire, puis d'aboutir à la construction d'une base de données spécifique.
- Cette base de donnée créée en 2007 dans VIVRE2, contient aujourd'hui 112 dossiers d'accidents tous survenus en agglomération.

Les principaux résultats statistiques contenus dans le rapport final de BOTTO P. (2009) montrent que :

a. Les accidents avec les véhicules lourds sont souvent mortels et que la majorité des accidents entre un véhicule industriel et un usager vulnérable ont lieu en milieu urbain, dans les intersections et se produisent majoritairement de jour.

b. Les usagers vulnérables concernés dans les chocs avec les camions sont essentiellement les piétons, bicyclettes, les vélomoteurs et les motocyclettes.
c. Les piétons sont les plus impliqués dans ce type d'accident.
d. Les accidents en intersection représentent 62% du total.
e. Les piétons sont les plus impliqués dans ce type d'accident (51%).
f. Toutes les faces du VI sont concernées principalement la face avant (62%) et la face latérale droite et la face avant (21%) qui représente la zone de chocs fréquents avec les vélos. La face gauche du véhicule est moins impactée que les précédentes (9%). La face arrière qui représente le plus faible pourcentage des accidents (5%), est à considérer dans l'étude puisque l'ensemble des conducteurs rencontrés ont déclaré la marche arrière comme particulièrement stressante et dangereuse pour les usagers vulnérables, à cause du manque de visibilité derrière le véhicule.

4. Etude des conditions lumineuses

La confrontation des théories sur le confort visuel avec des données réelles de statistiques d'accidents a apporté des connaissances nouvelles sur le rôle de la lumière naturelle et artificielle sur la sécurité routière, et notamment sur la vision en condition de conduite et les facteurs pouvant l'influencer : variation de luminosité, impact de la vitesse sur la vision, éclairage public... Des données fondamentales de compréhension des mécanismes de vision et de perception nocturne/diurne ont été obtenues.

Même s'il est difficile d'établir statistiquement l'influence directe de l'éclairage sur l'accidentologie, plusieurs études détaillées d'accident montrent qu'une action sur l'éclairage aurait permis de réduire la gravité, voire d'éviter l'accident. En recentrant les questions d'éclairages sur le ressenti des conducteurs par des éléments recueillis auprès d'une entreprise de chauffeurs-livreurs, ceci a permis d'avoir le point de vue subjectif des chauffeurs de VI.

L'analyse des accidents, le diagnostic des éléments de signalisation du véhicule et les remarques des chauffeurs de VI ont permis de cerner le besoin en vision et en signalisation de nuit comme de jour pendant les manœuvres, et d'une bonne lisibilité de la trajectoire /vitesse du véhicule industriel par les UVR.

Pour étudier cette problématique de lumière ou de vision, une méthodologie originale fondée sur le développement d'outil 3D de simulation de scènes d'accident de Labayrade et Fontoynont (2009a, b) et de Labayrade et al. (2009) a été réalisée et a abouti à la proposition de dispositifs à installer sur des VI réels. Des relevés géométriques et photométriques sur site

ont permis de calibrer le modèle en luminances, du point de vue du conducteur du véhicule industriel et de celui de l'usager vulnérable. Le rapport de synthèse final de Labayrade et Marty (2009) illustre le travail effectué sur la problématique de la lumière /visibilité ainsi que des propositions des solutions d'amélioration.

Figure 1 - Illustration de la scène des points de vue du VI et du motard

Figure 2 - Déporter les clignotants sur les parties supérieures

Dans une suite à donner au projet, la pertinence, l'acceptabilité et l'efficacité de ces dispositifs pourraient être évaluées en conditions réelles. Les pistes d'amélioration de vision grâce aux nouvelles technologies d'éclairage installées sur des véhicules industriels seraient à tester. Les conditions de conduite des chauffeurs pourraient être aussi améliorées au niveau de la fatigue visuelle et de la concentration.

5. Etude des comportements humains

Les recherches sur les comportements humains de Maincent (2009), ont portées, pour le diagnostic, sur la connaissance des situations à risque et des comportements potentiellement accidentogènes des usagers vulnérables et conducteurs de camions, et pour la prévention sur l'ergonomie des solutions d'assistance à la conduite des camions. Elles se sont appuyées sur des méthodes issues de la psychologie, de l'ergonomie et de l'ingénierie cognitives : analyses de similitude et évaluation des représentations (usagers vulnérables), analyses d'activité et entretiens (chauffeurs-livreurs), expérimentations sur simulateur dynamique de conduite.

Les résultats ont montré que les piétons ont une représentation globalement négative des camions en ville, axée essentiellement sur les nuisances environnementales (pollution, gêne) et non sur le risque d'accident. Ils ne font donc peut-être pas plus attention à un camion qu'à une voiture. Le secteur piétonnier représente pour les usagers vulnérables un environnement privilégié et protégé dans lequel le conducteur de camion est seul garant de leur sécurité. Leurs comportements ne reposent pas uniquement sur la compréhension du danger mais incluent la notion de prise de risque consciente. La perception du danger par les sujets s'avère correcte, mais ils sont plus de 50% à dire qu'ils adopteraient un comportement contraire à leur sécurité. Les résultats de cette étude (Maincent et al. 2008a,b), permettent de proposer des actions médiatiques de sensibilisation au comportement à risque et aux difficultés de conduite d'un camion vers les usagers vulnérables, et des systèmes d'assistance à la détection des usagers vulnérables autour du camion pour les chauffeurs.

6. Technologies en sécurité – méthodologie et outils pour la conception d'assistance

Une méthodologie d'essai du système d'assistance sur simulateur de conduite poids lourd de Mathern et al. (2009) a été définie, pour évaluer des solutions techniques dédiées à la sécurité,

l'influence du choix des capteurs sur l'efficacité du système et élaborer un module de gestion d'interface basé sur les besoins du conducteur. Pour les technologies de perception utiles aux systèmes d'assistance, une sélection de capteurs a été opérée à l'aide de diagrammes synthétisant leurs performances selon le type d'objet à détecter et de mesure désirée, la distance de détection et la définition des zones d'intérêts pour l'assistance.

Une conception itérative a structuré un prototypage rapide et réutilisable, et a permis d'évaluer la pertinence et l'efficacité d'un système d'assistance indépendamment des limites des technologies actuelles de perception de l'environnement ou d'automatisation. Le meilleur compromis en termes d'interactions conducteur/assistance et de spécification de technologies, a été obtenu par un développement itératif, inspiré des approches de conception anthropocentrée. Ensuite, une démarche globale décrite dans le rapport de synthèse de Tattegrain et al. (2009), a été utilisée pour le développement d'un système d'assistance pour la détection d'usager vulnérable, en plusieurs étapes:

- Définition d'une architecture logicielle pour intégrer le système d'assistance dans le simulateur et définir les modes d'échanges d'informations entre le monde simulé et le système d'assistance. Elle permet aussi d'optimiser l'intégration des différents modules dans le simulateur (capteurs, gestionnaire d'interface et restitution au conducteur).

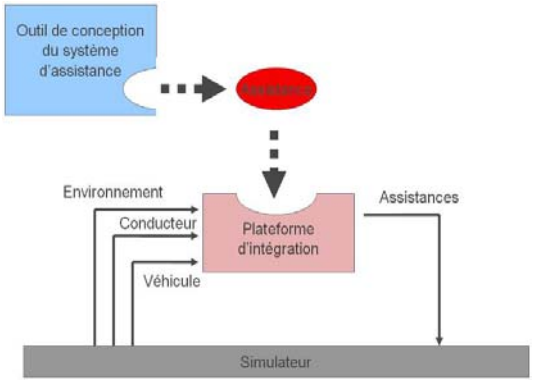


Figure 3 - Architecture de la plateforme

- Développement de la plateforme d'intégration du système d'assistance dans le simulateur permettant un développement simultané des fonctionnalités de communication entre le simulateur et l'assistance, et de l'assistance elle-même.
- Conception du **s**ystème d'assistance à partir des scénarios définis par l'analyse des besoins et test de ses effets dans des cas concrets (variantes du même scénario).
- Intégration du système d'assistance pour affiner les derniers réglages des paramètres.

7. Réalisation du prototype et intégration sur simulateur

7.1 Description du simulateur de conduite

Le simulateur dynamique de conduite SCOOP2 est un modèle de véhicule interactif dans lequel le conducteur est totalement immergé dans un environnement routier virtuel. Il est composé d'une cabine de camion interchangeable, montée sur une plate-forme dynamique à 6 degrés de liberté. Les logiciels de simulation et les systèmes de projection visuelle de la scène routière permettent l'immersion du conducteur dans différentes conditions de conduite, infrastructures routières, conditions de trafic et d'éclairement, et types de véhicule.

Le prototype sélectionne le type d'assistance à l'aide de deux sources d'informations principales : (i) position des usagers vulnérables autour du véhicule, formalisées par la définition de zones de détection, et (ii) actions du conducteur, formalisées par un modèle d'intention.

Figure 4 - Simulateur Dynamique de conduite RT

Pour la conception du système lui-même, des stratégies d'assistance, des IHM et des stratégies d'assistance ont été définies par zone concernée autour du véhicule. Le système d'assistance retenu est composé d'un anti-démarrage, d'un freinage d'urgence et d'un limiteur de vitesse, complétés par des retours informatifs visuels par caméras arrière et latérale et par des alarmes lumineuses et sonores en cabine.

7.2 Construction des scénarii de simulation

Cinq situations critiques à mettre en scène pour l'évaluation sur simulateur de conduite et une situation « sensible » (Tattegrain et al. 2009), ont été identifiées, incluant marche avant, tourne à droite et marche arrière (tableau 1). Pour chacune, le roulage, le démarrage ou le recul (marche arrière) est perturbée par la traversée ou la présence d'un piéton ou par le dépassement d'un cycliste.

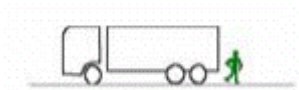
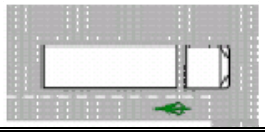
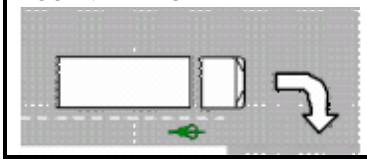
7.3 Spécification des IHM et des stratégies d'assistance

Des IHM et des stratégies d'assistance de Tattegrain et Bonnard (2010), ont été définies en fonction de chaque zone concernée autour du véhicule (arrière, angle latéral droit et avant du véhicule). Deux stratégies d'assistance ont été envisagées : des retours informatifs (vision directe/latérale/rétrovision sur écran/antéviseur et alarme lumineuse directionnelle et sonore), et une assistance active (anti-démarrage, freinage d'urgence et limiteur de vitesse) avec une prise en main du véhicule par le système, complétées par les retours informatifs.

7.4 Evaluation des systèmes et résultats

Evalué en milieu virtuel par un panel de conducteurs de poids lourds, le système VIVRE2 a montré son efficacité sur simulateur : 89% des accidents potentiels ont été évités sur l'ensemble des expérimentations. Les résultats de l'évaluation ergonomique indiquent que le système VIVRE2 a bien été accepté par les conducteurs de VI et son fonctionnement ne devrait pas entraîner une surcharge visuelle ou cognitive.

Tableau 5 : Description et codage des classes de situations et des situations critiques

Classes de situation	Manœuvre camion	UVR	Infrastructure
MARCHE ARRIERE 	Démarrage 0-10 km/h	Piéton statique 0 km/h	Passage piéton feu tricolore
			Impasse
	Prise de stationnement en marche arrière 0-10 km/h	Piéton en mouvement 0-10 km/h	Quai de déchargement en centre ville
MARCHE AVANT	Démarrage 0-10 km/h	Piéton statique 0 km/h	Secteur piétonnier
	Démarrage sortie stationnement double file 0-10 km/h	Piéton en mouvement 0-10 km/h	Voie ouverte à la circulation
MARCHE AVANT 	Dépassement d'un UVR sur la chaussée 20/40 km/h	Cycliste en mouvement 5-20 km/h	Secteur rectiligne
TOURNE A DROITE 	Tourne à droite au ralenti 0-20 km/h	Cycliste en mouvement 5-10 km/h	Croisement feu tricolore

Systèmes informatifs
Un accueil favorable a été fait par les conducteurs testeurs aux retours visuels sur écran pour les zones arrière et latérale et partagé sur l'antéviseur (zone avant) et sur le choix entre les alarmes sonores et visuelles.

Systèmes actifs
L'anti-démarrage et le freinage d'urgence ont été choisis par plus de 90% des sujets pour la zone arrière et pour la zone latérale, tandis que pour la zone avant, un quart des sujets préfèrent l'anti-démarrage seul. Pour l'angle mort pendant la phase roulage, l'anti-démarrage n'a pas d'utilité, et certains préfèrent avoir uniquement un retour informatif.

Le *limiteur de vitesse* a été rejeté par 80% des sujets. Quelle que soit la zone considérée, tous les sujets ont choisi de compléter les assistances actives par des systèmes informatifs.

Enfin, les travaux de conception et d'évaluation sur simulateur de conduite ont permis de valider un système global d'aide à la conduite des camions (stratégies d'assistance et IHM), destiné à la détection et à la prévention des accidents avec les usagers vulnérables pour les situations de manœuvres ou de circulation à basse vitesse en milieu urbain.

8. Exploitation Industrielles des résultats et perspectives

Les résultats du projet VIVRE2 sont nombreux et diversifiés :

- Dans le domaine de l'accidentologie, une base de données sur les accidents entre usagers vulnérables et véhicules industriels et des fiches synthétiques de quelques accidents sélectionnés sont aujourd'hui disponibles.
- Dans le domaine de l'éclairage, de la visibilité et de la lumière, des recueils de besoins des conducteurs de véhicules pourront être consultés, un outil de simulation 3D pourra être exploité pour d'autres analyses et évaluations de solutions. Les solutions proposées

répondent au besoin du conducteur d'amélioration de la visibilité en conditions de manœuvre nocturne et aux autres usagers d'identifier l'intention de changement de direction, même en cas de fort contraste, là où les clignotants ne sont plus visibles. Enfin cette technologie reste compatible avec les contraintes du milieu automobile: faible consommation électrique, longue durée de vie, résistance aux chocs et aux intempéries.

- En termes de comportements humains, un enrichissement des connaissances a été acquis dans le domaine de la conscience du danger et de la prise de risque par les usagers vulnérables, et dans le domaine de l'activité de travail des conducteurs de camion en milieu urbain. Ces connaissances pourront être utilisées pour la conception de futurs systèmes d'assistance à la conduite pour la protection des usagers vulnérables pour d'autres types de véhicules. De plus, un support dynamique d'entretien sous forme d'un DVD accompagné d'un questionnaire a été élaboré et pourra être exploité pour d'autres enquêtes à destination des usagers vulnérables.
- Pour le développement de systèmes d'assistance sur simulateur, la méthodologie de conception structure une approche réutilisable de prototypage rapide permettant d'évaluer la pertinence et l'efficacité d'un système indépendamment des limites des technologies actuelles de perception de l'environnement ou d'automatisation. Elle favorise des cycles courts de développement/test basées sur deux outils interopérables, et permet un développement simultané des fonctionnalités de communication entre le simulateur et l'assistance, et de l'assistance elle-même.

Ce projet a permis aussi d'intégrer de nouvelles fonctionnalités du simulateur de conduite en enrichissant la base de donnée de la ville simulée avec des objets virtuels additionnels et des scenarii de simulation de conduite en milieu urbain, en améliorant les interactions entre les usagers et le véhicule simulé, en implantant en équipant la cabine d'alertes visuelles/ sonores et d'écrans et enfin en intégrant les outils développés.

Les retombées industrielles et économiques pourront s'étendre aux produits, une fois la phase d'évaluation sur un démonstrateur et en site d'essai réalisée. Les solutions techniques conçues pour éviter les accidents impliquant des camions ou protéger les autres usagers de la route, et en particuliers les usagers vulnérables, ne se limitent pas aux véhicules de distribution mais pourront concerner toutes les gammes de véhicules industriels. Ces solutions seront hiérarchisées en fonction du ratio coût/efficacité (sécurité réelle perçue) et permettront de devancer les attentes citoyennes. Leur impact et positionnement par rapport aux réglementations existantes seront également pris en compte.

Remerciements

Nous remercions tous les partenaires ayant contribués à l'édition de cet article et du film de communication sur le projet VIVRE2 de Dury et al. (2009).

Références

- Dury, C., Maincent, A., Tattegrain, H., Labayrade, R., Marty, C., Roissac, Z. (édition avril 10). Objectif : VIVRE (DVD). Présentation du projet VIVRE2 – Véhicules Industriels et Usagers Vulnérables de la route, ANR-05-PDIT-OO2-06, produit par l'INRETS & le CNRS, PIA/ISH, Lyon.
- Labayrade, R., Fontoynont, M. (2009a), "Use of CIE 171:2006, Test cases to assess the scope of lighting simulation programs", Proceedings of CIE Mid-Term, Budapest, 27-29 May.

- Labayrade, R., Fontoynont, M. (2009b), "Alternatives to IES lights in lighting simulation softwares", Proceedings of LUX Europa, Istanbul, 9-11 September.
- Labayrade, R., Jenson, H.W., Jenson, C. (2009), "Validation of Velux Daylight Visualizer 2 against CIE 171:2006 Test cases", Proceedings of Building Simulation, 27-30 July.
- Maincent, A., Brun, L. and Martin, R. (2008a), "Pedestrians' representations about risky behaviours in urban areas", Proceedings of International Conference on Traffic and Transport Psychology, Washington, Septembre, Elsevier.
- Maincent, A., Brun, L. and Martin, R. (2008b), « Représentations et conscience du risque chez le piéton confronté aux camions en ville : esquisse d'une méthodologie. Le piéton et son environnement : quelles interactions, quelles adaptations », Actes du colloque international PFI-COPIE, INRETS n°115.
- Mathern, B., Bonnard, A. and Tattegrain, H. (2009). "Method of driving assistance system design to improve human-vehicle interactions and safety technologies developments for trucks", 21st ESV Conference, Stuttgart, Germany, 15-18 June, 5 p.
- Tattegrain, H., Bonnard, A. and Mathern, B. (2009), Benefit of "Dynamic Use Cases" to early design and driving assistance system for pedestrian/truck collision avoidance", 21st ESV Conference, Stuttgart, Germany, 15-18 June, 6 p.
- Tattegrain, H., Bruyas, M-P. and Karmann, N. (2009), "Comparison between adaptive and basic model metrics in lane change test to assess in-vehicle secondary task demand", 21st ESV Conference, Stuttgart, Germany, 15-18 June, 8 p.
- Tattegrain, H., Bonnard, A. (2010), "Advantages of a driver model use in the design of a driving assistance system to prevent collisions between deliver trucks and vulnerable road users", Conference "Human Centred Design for Intelligent Transport Systems", 29-30 April, Berlin.

Les références bibliographiques de VIVRE2 sont dans les rapports de synthèses suivants :

- Botto, P. (2009), « Rapport final accidentologie », projet VIVRE2, Avril, 40 p.
- Labayrade, R. et Marty C. (2009), Rapport de synthèse final, INGELUX ENTPE.
- Maincent, A. (2009), Rapport de synthèse final, LEACM.
- Tattegrain, H., Bonnard, A., Bruyas M-P., Deleurence P. (2009), Rapport de synthèse LESCOT.

AMELIORATION DES CONNAISSANCES SUR LES ACCIDENTS IMPLIQUANT UN AUTOMOBILISTE ET UN PIETON : PROJET CACIAUP

Docteur en Mathématiques Appliquées en 1993, Université Aix-Marseille I. Ingénieur de recherches en accidentologie depuis 1994 au CEESAR puis au sein du LAB depuis 2005.

Ingénieur d'études en accidentologie (Voiture, deux-roues motorisé, Poids Lourds, Piéton) au CEESAR depuis 2005. Ingénieur Sécurité des Transports en 2003, Université de Versailles Saint-Quentin. Ingénieur en Maintenance Industrielle en 2002, ENSIAME (Valenciennes).

Thierry HERMITTE
Laboratoire d'Accidentologie, de Biomécanique, Peugeot Citroën – Renault
Nanterre, France

Vuthy PHAN
Centre Européen d'Étude de Sécurité et d'Analyse des Risque
Nanterre, France

Résumé

Aujourd'hui les accidents impliquant des usagers vulnérables font partie des axes prioritaires de recherche en sécurité routière. Le dernier bilan accidentologique en France pour l'année 2007 confirme cette tendance. Parmi ces usagers vulnérables, le piéton est celui dont la protection dépend essentiellement des autres usagers. La sécurité passive s'améliore peu à peu (pour ce qui est du piéton en tout cas) sur nos véhicules grâce aux nouvelles réglementations ou autres tests consuméristes (EuroNCap par exemple). Les progrès les plus attendus sont ceux relatif à l'évitement de l'accident, la sécurité active. Cependant, pour concevoir les systèmes les plus efficaces et les mieux adaptés il est indispensable de bien identifier les problèmes. Pour cela il est nécessaire de disposer de données d'accidents très détaillées pour pouvoir ensuite analyser les résultats et faire progresser nos connaissances. C'est la raison pour laquelle le projet CacIAuP à vu le jour. Ce projet, financé par la FSR (Fondation Sécurité Routière) pour une durée de 3 ans, est articulé autour de 3 axes principaux : la collecte de données d'accidents, l'analyse des mécanismes accidentels et l'analyse des mécanismes lésionnels. Le présent article propose de présenter les motivations qui sont à la base de ce projet.

Mots-clés: accident de piétons, collecte de données, analyse des causes, mécanisme accidentels, mécanismes lésionnels.

Abstract

Today the vulnerable road users are one of the priorities in road safety researches. The last figures in France confirm this tendency. Among these vulnerable users, the pedestrian is the one whose protection depends essentially on the other users. The passive safety improves year by year (as for the pedestrian in any case) on our vehicles thanks to the new regulations or the other consumerist tests (EuroNCap for example). The most expected progress is the ones concerning the accident avoidance, the active safety. However, to conceive the most effective and best adapted safety systems it's important to identify correctly the problems. For that it is necessary to have very detailed accident data to be able to analyze the results and make progress our knowledge. It is the reason for which the CacIAuP project has been proposed. This project, financed by the FSR (Fondation Sécurité Routière) for a duration of 3 years, is articulated around 3 main axes: an accident data collection, the analysis of the accident mechanisms and the analysis of injury mechanisms. The present article suggests presenting the motivations which are on the base of this project.

Keywords: Pedestrian accidents, accident data collection, analysis of causes, accident mechanisms injury mechanisms.

1. Introduction

Aujourd'hui la sécurité routière fait partie des principales préoccupations du citoyen. Les progrès récents qui ont été observés en la matière en France et qui font de notre pays un des exemples au niveau européen montrent à quel point il est important que l'ensemble des acteurs (politique, industriel, associatif, public, etc.) agissent ensemble vers cet objectif ultime : sauver des vies. Il est évident que chacun à un rôle à jouer : le constructeur automobile doit améliorer la protection des usagers, les constructeurs de route offrir une infrastructure plus sûre, la réglementation harmoniser et imposer un minimum requis en terme de sécurité, le politicien doit mettre en place des mesures et les faire appliquer, l'EuroNCAP évaluer les performances protectrice des véhicules, etc.

Mais tout cela ne peut être entendu que si les efforts demandés répondent à la réalité de besoins établis. Ainsi, il peut paraître aberrant d'imposer la construction d'immeubles munis de dispositif antisismique dans une zone où ce risque est quasiment nul surtout qui plus est dans un contexte économique difficile.

Il est donc important avant toute chose d'établir un diagnostic précis de ce qui est, afin de savoir d'une part si les mesures à prendre correspondent à la réalité des problèmes et d'autre part de mieux cibler les systèmes de sécurité à mettre en place ou de les planifier en fonction des améliorations technologiques.

Aujourd'hui, dans un contexte économique qui évolue (augmentation de la fréquentation des transports collectifs et recul de la consommation d'essence) et un renfort de la politique de sécurité routière qui modifie peu à peu l'accidentologie en France (par exemple le nombre de tués dans les voitures de tourisme rapportés à la mortalité globale est passé de 66% en 2000 à 53% en 2007), il est important de mettre à jour régulièrement nos connaissances. Si d'un point de vue des enjeux cela ne pose que très peu de difficultés (cf. APROSYS, TRACE, SafetyNet), la connaissance fine de ces accidents doit être renouvelée de façon périodique. Or aujourd'hui, pour connaître les orientations à prendre en termes de sécurité routière (politique et/ou technique) il est nécessaire d'identifier clairement ces problèmes.

Afin de permettre ces analyses, il est nécessaire de constituer un système d'information performant sur les accidents de la route. Ce système ne s'arrête pas à la constitution de base de données d'accident (tels que le BAAC de l'ONISR ou les Études Détaillées d'Accidents EDA (Ferrandez 1995) telles que réalisées par l'INRETS et le LAB) mais doit prendre en compte les modèles théoriques sur lesquelles reposent ces analyses, la création d'indicateurs pertinents permettant de suivre l'évolution des performances, et les outils statistiques pour mesurer, évaluer, estimer l'efficacité de tel système ou de telle mesure de sécurité. Il doit également prendre en compte la notion de point de vue liée à la diversité des acteurs (métier, rôle, organisation, positionnement, etc.) et les différents aspects de l'accident.

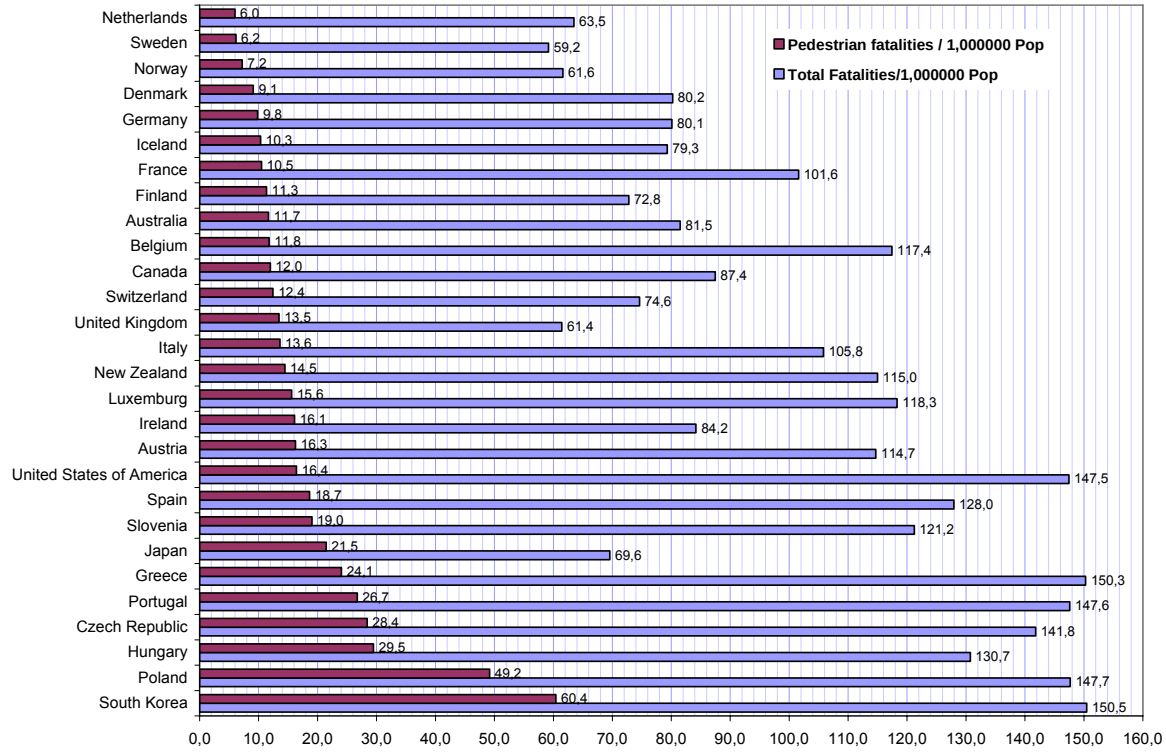
Si l'évolution des véhicules et de leurs technologies en matière de sécurité a fortement contribué à éviter l'accident et à mieux protéger leurs occupants, les usagers vulnérables (piétons, usagers de deux-roues) sont, quant à eux, dépourvus de protection. Il paraît donc nécessaire de mieux comprendre à la fois le mécanisme qui a entraîné l'accident afin de pouvoir proposer des solutions en vue d'éviter ces accidents et le mécanisme qui a occasionné les blessures du piéton afin de le protéger en cas de choc.

2. Les accidents de piéton : éléments d'appréciation

Nous proposons dans cette partie de rappeler quels sont les enjeux de l'accidentologie liés aux piétons dans le monde, en Europe et en France. Les chiffres suivants reposent essentiellement sur la mortalité car d'une part se sont les données les plus communiquées et d'autre part les définitions du tué d'un pays à l'autre sont relativement homogènes et bien connues, contrairement à celle des blessés.

2.1 Dans le monde

Concernant les accidents mortels piétons il existe de grandes disparités entre les pays. Une façon de comparer les pays entre eux est de pondérer le nombre de piétons tués par la population du pays. Comme le montre le graphique ci-dessous, les écarts entre les grands pays industrialisés sont faibles. Cependant le rapport entre le taux le plus faible (Pays-Bas) et le taux le plus fort (Corée) est d'environ 10.



Source : IRTAD

Figure 1 – Taux de piétons tués par millions d'habitants en 2003

2.2 En Europe

En 2004[1,] dans l'Europe des 27, on dénombré 46 926 personnes décédées dans un accident de la route. Parmi ces tués 9213 étaient des piétons, soit presque 19,6% de l'ensemble des usagers. A l'intérieur de l'EU27 les disparités sont très grandes entre l'Ouest et l'Est.

En Europe de l'Ouest la proportion de piétons tués par rapport à la mortalité globale est assez homogène pour l'ensemble des pays avec une moyenne de 14%. En tête on retrouve dans l'ordre les Pays pas (8%), la Belgique (9%) et la France (10%). En queue de peloton se placent le Royaume uni (21%), la Grèce (18%) et le Portugal (18%).

[1] Derniers résultats complets disponibles sur la mortalité des piétons dans l'ensemble des pays de l'UE27.

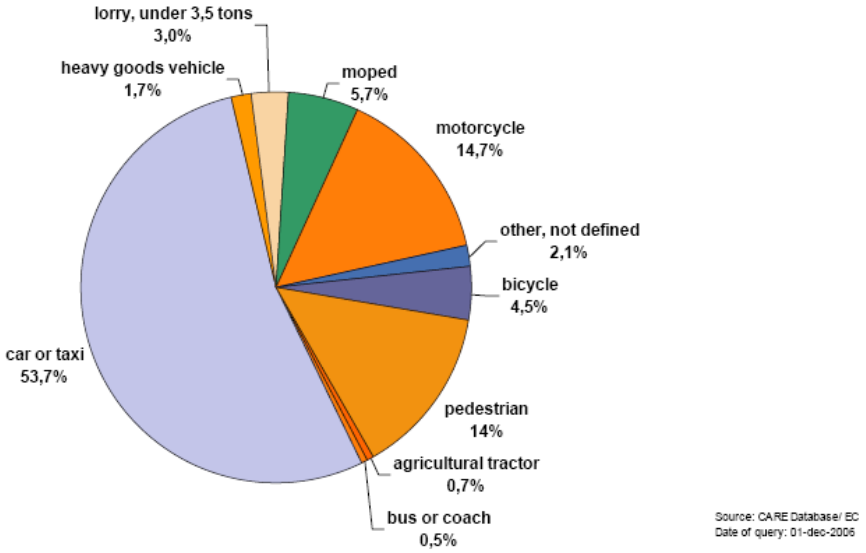


Figure 2 – Répartition des tués par catégorie d'usagers en Europe, année 2004

Du côté de l'Europe de l'Est, la moyenne s'élève à 26%. Si l'on ne tient pas compte de petits états tels que Chypre ou Malte, cette moyenne grimpe à 30%, soit plus du double de celle de l'EU15. Les plus mauvais taux sont pour la Roumanie (43%), la Lettonie (38%), puis ex aequo la Pologne, la Lituanie et l'Estonie avec 35%.

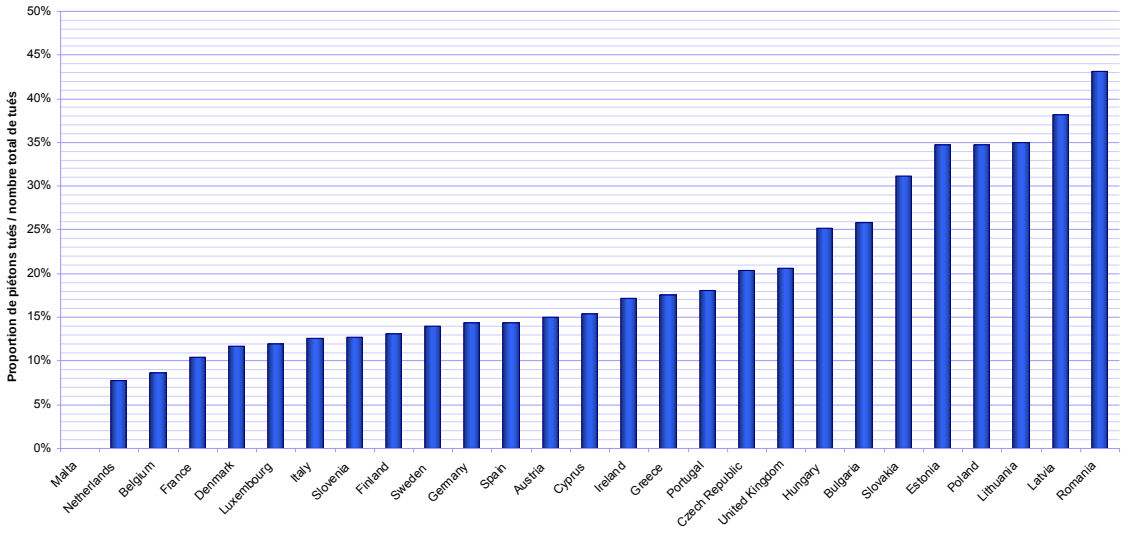


Figure 3 – Répartition du taux de piétons tués par rapport à l'ensemble des tués pour l'ensemble des pays de l'UE27 au cours de l'année 2004
(Source CARE, IRTAD)

L'EU15 qui compte parmi les états les plus peuplés (79% de l'ensemble de la population dans l'Europe des 27) représente 49% de l'ensemble des piétons tués. Il est à noter que 47% de ces tués sont recensés en Europe Centrale ou de l'est (Hongrie, Bulgarie, Slovaquie, Estonie, Pologne, Lituanie, Lettonie et Roumanie).

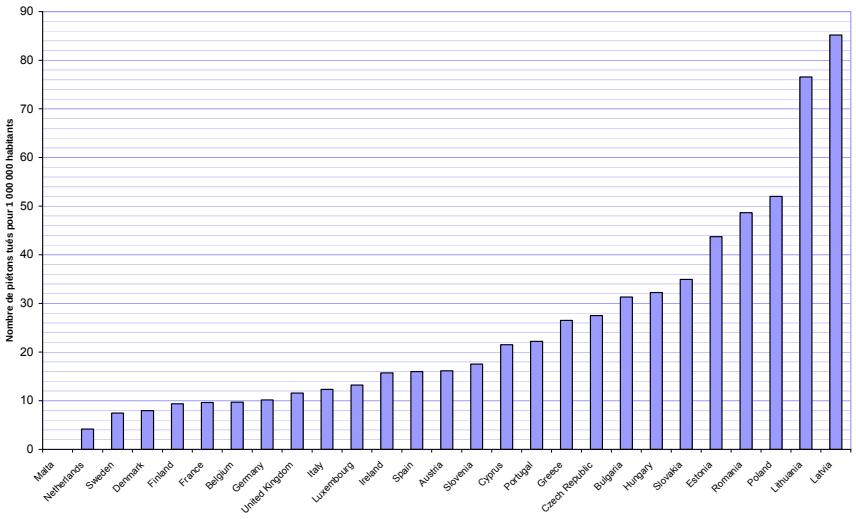


Figure 4 – Répartition du taux de piétons tués pour 1000000 habitants pour l'ensemble des pays de l'UE27 au cours de l'année 2004 (Source CARE, IRTAD)

2.3 En France

En France, en 2007, les piétons représentaient 12% des tués sur la route, soient 561 usagers. Cette proportion reste la même pour les blessés hospitalisés et légers avec respectivement 5310 et 8096 piétons blessés. Fait encore plus aggravant, entre 2006 et 2007, les piétons, ainsi que les usagers de deux-roues motorisés, sont les seules catégories d'usagers dont le nombre de tués a augmenté d'une année à l'autre (+ 4,9% pour les piétons, + 2,5% pour les cyclomotoristes et + 7,9% pour les motocyclistes). Comme dans la plupart des pays industrialisés, la grande majorité des piétons tués sont des personnes agés (53% des tués sont agés de 65 ans et plus).

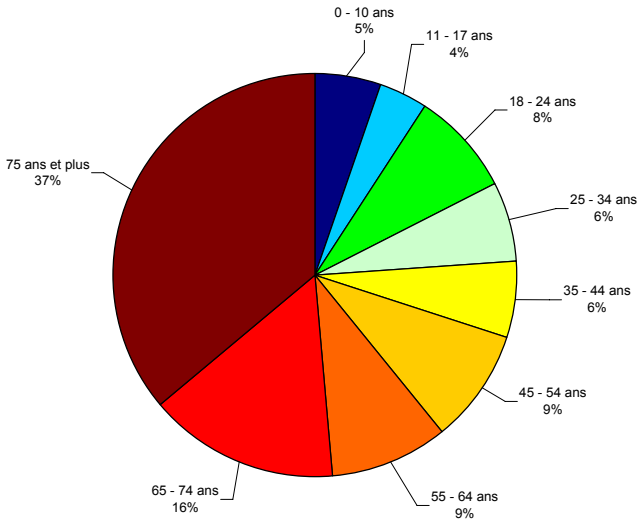


Figure 6 – Répartition par classe d'age des piétons tués en France au cours de l'année 2007 (Source ONISR)

3. L'état de l'art

Si l'évolution des véhicules et de leurs technologies en matière de sécurité a fortement contribué à éviter l'accident et à mieux protéger leurs occupants, les usagers vulnérables (piétons, usagers de deux-roues) sont, quant à eux, dépourvus de protection. Il paraît donc nécessaire de mieux comprendre à la fois le mécanisme qui a entraîné l'accident afin de

pouvoir proposer des solutions en vue d'éviter ces accidents et le mécanisme qui a occasionné les blessures du piéton afin de le protéger en cas de choc.

L'évitement des accidents impliquant les piétons passe par l'identification de typologie d'accident et de leurs causes associées en posant des questions précises. Quels sont les mécanismes accidentels ? Pourquoi un véhicule est rentré en collision avec un piéton ? Quel système de sécurité propre au véhicule aurait pu éviter le choc ? Quels sont éventuellement les problèmes liés à l'infrastructure ?

La protection du piéton (les usagers de véhicule tués ou blessés sont rares lors d'une collision avec un piéton) nécessite la compréhension du contexte précis avant, pendant et après le choc. Comment le piéton s'est blessé ? Contre quoi y-a-t-il eu un impact ? Quelles sont les conséquences lésionnelles observées chez le piéton et leur gravité ?

La plupart des résultats se focalisant sur les accidents de piétons proviennent des données statistiques nationales. Ces dernières reposent sur les données d'accidents, recensées par les forces de l'ordre, qui alimentent les bases de données nationales (les fichiers BAAC : Bulletin d'Analyse d'Accident Corporel de la Circulation en France) ou européennes (CARE, Community database on Accidents on the Roads in Europe).

Ces études macro-accidentologiques n'identifient que pauvrement les causes d'accidents. En effet, le processus complexe que représente un accident n'est ni analysé, ni enregistré dans de telles bases de données sachant que la plupart des variables dans ces bases sont descriptives et non pas analytiques. Toutefois, ces études permettent de déterminer les enjeux en termes de sécurité routière car elles regroupent (en théorie) l'intégralité des accidents corporels. Par exemple, en France, on s'aperçoit que la tranche d'âge la plus touchée dans les accidents mortels de piétons est celle des 65 ans et plus qui représente à elle seule presque la moitié des piétons tués (44%). Les accidents mortels sont, pour l'ensemble des usagers, plus nombreux en rase campagne qu'en milieu urbain sauf pour les piétons où la tendance est même inversée (65% en milieu urbain). Ces données très descriptives ne nous permettent pas de comprendre les circonstances et les conséquences de ces accidents.

Ce type de données peut nous permettre de déterminer des axes de recherche mais il n'est pas adapté à l'identification réelle des problèmes. Ce manque d'information doit être complété par des études micro-accidentologiques ou plus communément appelée des Études Détaillées d'Accidents (EDA). Ces enquêtes sont basées sur la constitution d'un échantillon d'accidents collectés le plus rapidement possible, analysés dans le détail puis codés par une équipe spécialisée. Ces analyses vont nous permettre de déterminer les mécanismes accidentels et lésionnels et de travailler sur des typologies d'accidents plus complètes et plus adaptées.

Enfin, ce système d'information doit également être complété par des données d'exposition, qui vont nous permettre de réaliser des analyses de risque. La seule difficulté dans ce cas est de trouver la source adéquate pour l'estimation du risque associée à la population concernée.
Au niveau européen, plusieurs projets se sont penchés sur les accidents impliquant un piéton et plus particulièrement sur les mécanismes accidentels et lésionnels :

- ✓ TRACE (TRaffic Accident Causation in Europe) est un projet européen, financé par la Commission Européenne, et dont le but est de mettre à jour les connaissances acquises jusqu'à aujourd'hui sur les causes des accidents de la route en Europe, puis d'estimer les bénéfices attendus (en termes d'accidents évitables et de vies sauvées) d'une

sélection de systèmes technologiques de sécurité prometteurs. Ce projet a débuté en 2006 et s'est terminé en 2008.
Une des thématiques de ce projet visait les accidents de piéton (TRACE D1.2, 2008). 100 EDA piétons ont été analysées. Cet échantillon regroupait plusieurs bases de données européennes se focalisant sur les EDA entre 2004 et 2007 (base de données d'IDIADA en Espagne et du LMU en Allemagne). L'analyse de ces EDA a mis en avant les défaillances fonctionnelles des usagers dans l'accident. Ces défaillances correspondent à une fonction dans le traitement de l'information dont la mauvaise réalisation ou l'absence de réalisation entraîne un basculement de la situation de conduite vers une situation d'accident.
La faiblesse du nombre de cas étudiés dans ce projet, malgré la collaboration de plusieurs centres de recherche européens, montre qu'il est nécessaire de se focaliser sur ce type d'accident afin d'accroître nos connaissances sur ce sujet.

- ✓ APROSYS (Advanced PROject SYStems) est un projet européen qui s'est focalisé sur la sécurité passive, c'est-à-dire sur la protection des usagers en cas d'accident. Les trois objectifs identifiés dans ce projet sont :
    - Améliorer la sécurité passive pour tous les usagers de la route, en Europe, en prenant en compte les scénarios d'accident les plus pertinents,
    - Accroître le niveau de compétitivité des industries automobiles européennes,
    - Améliorer l'efficacité en adoptant une approche intégrée.

  Tous les types d'usager ont été traités (voitures, camion, piéton, cycliste…). Au total 70 EDA piétons ont été analysés dans ce projet. Ces EDA sont issus des bases de données provenant de différents pays européens (Grande Bretagne, Espagne, Suède, Allemagne). Ce projet a mis en relation les blessures des piétons et leur gravité avec les caractéristiques techniques de l'accident (vitesse d'impact, localisation du choc). Les résultats de ce projet sont très intéressants. En effet, il est montré qu'il existe une différence entre les tests EuroNCAP pour les chocs têtes sur le pare-brise et l'accidentologie réelle : les impacts tête mortels dans les EDA montrent que ces derniers sont sur et autour du pare-brise alors que l'EuroNCAP teste les impacts tête seulement sur le capot. Cette étude montre la nécessité de l'utilisation des EDA afin d'orienter la réglementation vers la résolution de problèmes réels et d'aider à la définition de solutions techniques à apporter sur les véhicules pour protéger ces usagers en cas de choc.

En France, une étude s'est focalisée sur la protection des piétons : le projet APPA (Amélioration de la Protection des Piétons en cas d'Accident) financé en partie par la Direction de la Sécurité et de la Circulation Routière (DSCR) et le PREDIT (Programme national de Recherche d'Expérimentation et d'Innovation dans les Transports terrestres). L'objectif de ce projet était de mieux connaître les mécanismes mis en jeu dans les accidents de piétons et les moyens à mettre en œuvre pour assurer leur protection.(APPA 2007) Par ailleurs, l'amélioration de ces connaissances est à mettre en relation avec les activités réglementaires, notamment en ce qui concerne la configuration de choc (positions relatives piéton/voiture) et la vitesse d'impact.

Ces travaux ont montré la complexité des accidents de piétons et les difficultés à les reconstruire avec précision. Ils ont permis d'identifier les mécanismes de blessure aux membres inférieurs et de réaliser une analyse critique des impacteurs. Cette recherche a également permis de développer les liens avec des groupes de travail européens et

internationaux. L'étude accidentologique basée sur l'analyse d'accidents mortels VL/piétons (accidents répertoriés par les forces de l'ordre et le Registre du Rhône) réalisée dans le cadre du projet a montré qu'il était nécessaire d'une part de disposer d'informations plus complètes sur les blessures survenues aux impliqués (piétons) et d'autre part de mettre en relation ces blessures avec les déformations observées sur le véhicule.

Aujourd'hui, cette typologie d'accident est déjà prise en compte dans les EDA en temps réel par l'INRETS et le CEESAR, mais le nombre de cas traités reste très faible ce qui affaiblit les analyses et études qui en découlent. Les principales raisons sont les suivantes :

- la connaissance de l'accident (l'appel) ;
- le délai d'intervention de l'équipe qui doit être plus rapide que pour d'autre type d'accidents ;
- le faible niveau d'information recueillie par la police (pas de photo, et quelques fois pas de plan) ;
- le déplacement du véhicule qui ne se trouve plus dans sa position finale ;
- les faibles dégâts subis par le véhicule.

4. Le projet CAcIAuP

L'objectif principal du projet CAcIAuP est l'amélioration des connaissances sur les causes d'accidents impliquant au moins un piéton. Ce projet est fiancé par la Fondation Sécurité Routière (FSR) et comporte 2 partenaires, le LAB et le CEESAR. Ce projet a débuté le 1er juin 2009 pour une durée de 3 ans. Ce projet est axé autour de 2 composantes principales, une dédiée au données (recueil d'information sur les accidents) et une relative à l'amélioration des connaissances par le biais d'étude et d'analyses.

Pourquoi s'orienter vers une étude EDA spécifique piéton ?

- Comme déjà présenté auparavant, il est important que notre système d'information soit le plus complet possible. Or aujourd'hui cet échantillon (accidents de piéton) reste très faible de part les difficultés relatives à sa collecte.
- Les piétons sont parmi l'ensemble des usagers ceux dont la vulnérabilité est la plus importante.
- Nous sommes tous concernés par cette problématique. Nous sommes tous à un moment donné de notre journée un piéton. Malgré toutes les précautions que nous pouvons prendre pour nous ou notre famille, le danger reste permanent.
- Les derniers bilans montrent que même si nos chiffres sont parmi les plus faibles en Europe (12% de l'ensemble des tués en France contre 43% en Roumanie par exemple), la situation dans notre pays reste préoccupante avec une augmentation de la mortalité ces dernières années (+5% en 2007 comparée à 2006).
- Les dernières études françaises reposent sur des données des années 2002 à 2004. Il est important d'effectuer une mise à jour de nos connaissances en particulier dans un contexte qui change.
- Les dernières études ont montré que les personnes âgées étaient sur-impliquées dans ce type d'accident. L'allongement de la durée de vie ainsi que les données démographiques montrent que cette population est et sera en forte croissance. Il est donc important d'étudier ce problème dès aujourd'hui pour apporter le plus rapidement possible des solutions concrètes.
- La recherche de solutions adaptées passe par cette connaissance fine.

- En sécurité passive : depuis de nombreuses années la protection des piétons est prise en compte dans le développement des nouveaux véhicules grâce en partie aux tests EuroNCap ou autres réglementations. Les questions qui se posent sont d'une part de savoir si ces tests reflètent la réalité des accidents et d'autre part si les progrès réalisés sont visibles ?
- En sécurité active : les systèmes de sécurité permettant l'évitement de l'accident représentent l'avenir. L'évolution de la technologie et sa démocratisation vont jouer un rôle important dans le développement de tels systèmes. Si d'un point de vue technique ces capteurs sont capables de grandes performances, la réalité du terrain montre que les situations dans lesquelles interviennent les accidents ne sont pas aussi simples à identifier. En particulier pour le piéton les difficultés proviennent de son déplacement (parfois aléatoire) de la soudaineté de la situation (non prévisible), du contexte général où il évolue (ces accidents se retrouvent principalement en agglomération où la scène est polluée par le mobilier urbain, les autres usagers, le trafic, etc.).

4.1 Articulation du projet

Pour répondre aux différentes attentes énumérées auparavant, nous avons articulé le projet CacIAuP autour de 3 axes principaux:

- ✓ La mise en place d'une étude détaillée d'accident spécifique pour les piétons en collaboration avec un ou plusieurs centres hospitaliers, voire les services d'urgence. En particulier, l'idée est d'optimiser l'alerte, de disposer de bilans médicaux complets, de faire évoluer le recueil de données, et d'améliorer les techniques liées à la reconstruction. La cible est de disposer d'un échantillon de 90 cas sur 3 ans qui nous servira de support pour nos analyses.
- ✓ La mise en place d'un suivi des personnes ayant été blessées au cours de l'accident. Ce suivi sera effectué jusqu'à consolidation des séquelles dès lors qu'elle est médicalement constatée. L'idée est d'introduire dans les EDA la codification internationale IIS (Injury Impairment Scale) permettant de tenir compte des séquelles suite aux blessures observées. Cette codification est déjà prise en compte dans le registre du Rhône, mais n'a pas encore été entreprise dans les EDA classiques.
- ✓ Des études thématiques sur les sujets suivants :
  - Identification des principales configurations d'accident et de leurs caractéristiques principales. L'idée est de mettre à jour les scénarios type d'accident initiés par l'INRETS (Fleury 2001) dans le cadre des accidents piéton et de compléter ces typologies par des caractéristiques qui pourront être utiles à la spécification des systèmes de sécurité adaptés. Pour chaque configuration, une analyse des mécanismes accidentels et lésionnels ainsi que l'identification des causes associées. Nous proposons de compléter cette analyse par l'intégration du modèle des défaillances fonctionnelles développé par l'INRETS (Elslande 1997) ;
  - Une analyse basée sur les besoins des usagers qui sont confrontés à ce type de situation. L'idée est d'identifier les besoins réels des usagers à partir de l'analyse de leurs défaillances. Il s'agit ici d'étendre le modèle initié dans le projet TRACE (TRACE D4.1.5 2008) pour les conducteurs, à l'étude des accidents avec piétons et de proposer dans la mesure du possible une extension au piéton lui-même.
  - Une analyse globale des lésions observées avec un zoom spécifique sur les cas dont la vitesse au choc entre dans le cadre des tests règlementaires. Un des

apports de cette analyse est de pouvoir réaliser un état des lieux des blessures les plus fréquentes et également de mettre en relation les blessures avec l'élément heurté (partie du véhicule ou autre).

Bien évidemment ce dernier axe tire parti de l'ensemble des avancées et résultats produits par les autres recherches.

4.2 Retombées attendues

Retombées attendues pour la sécurité routière :

- amélioration du système d'information sur les accidents de la route
- diagnostic de sécurité sur les accidents piétons (configuration, causes, circonstances, etc.)

Retombées attendues pour les constructeurs automobiles :

- meilleures connaissances des mécanismes accidentels et lésionnels ;
- aide à l'élaboration de système de sécurité active adapté
- aide à l'amélioration des procédures de réglementation

Références

- APPA (2007), Projet : Amélioration de la Protection des Piétons en cas d'Accident, Rapport final
- APROSYS (2004), "D-General, SP3 : Pedestrian and Pedal cyclist Accidents", final report.
- Fleury, D., and Brenac, T. (2001), "Accident prototypical scenarios, a tool for road safety research and diagnostic studies", Accident Analysis and Prevention 33, 267–276.
- CEESAR, INRETS, UCBL, INVS (2004), « Description et gravité des lésions traumatiques selon les classifications AIS 1998 et IIS 1994 », ISBN: 2-11-094954-6.
- Ferrandez, F. (Ed.) (1995), « L'études détaillées d'accidents orientés vers la sécurité primaire : méthodologie de recueil et d'analyse », Paris : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Van Elslande, P., Alberton, L. (1997), « Scénarios - types de production de l'erreur humaine dans l'accident de la route », Rapport INRETS 218.
- TRACE D1.2 (2008), "Road users and accident causation. Part 2: In-depth accident causation analysis", Report.
- TRACE D4.1.5 (2008), "Assessing drivers' needs and contextual constraints for safety functions: a human centred approach from in-depth accident analysis", Report.

OUTIL VIDEO POUR LA MESURE DE MATRICES ORIGINE/DESTINATION EN GIRATOIRE

Y. GOYAT

F. MENANT
LCPC
Bouguenais, France

O. PITARD

T. CHATEAU
LASMEA, université Blaise Pascal
Aubière, France

Résumé

Dans le cadre des études de circulation qu'il est nécessaire d'effectuer pour appréhender les modifications et redimensionnements éventuels de l'infrastructure routière, un certain nombre de données doit être prélevé directement sur le terrain. Outre les comptages automatiques sur différentes sections de la zone étudiée, les comptages directionnels constituent un apport essentiel dans la constitution des données nécessaires à l'étude. Dans un cas comme dans l'autre, le recours à l'homme s'avère pour l'instant nécessaire, ce qui génère plusieurs contraintes telles que la sécurité des personnes et les difficultés de travailler aux abords des voiries fortement circulées.

Fort de ce constat, le LCPC a proposé d'utiliser l'observatoire optique de trajectoires (ODT) pour délivrer des matrices origines / destination en giratoire. Les résultats sont très prometteurs et une adaptation de cet ODT est en cours de développement grâce au concours d'OSEO.

Mots-clés: suivi visuel, trajectoire de véhicule, filtre à particules, MCMC, matrice O/D, giratoire.

Abstract

Within the framework of the circulation studies which it is necessary to apprehend the modifications of road infrastructure, some information must be measure directly in-situ. In addition to automatic traffic measurement on various sections of the studied zone, directional countings constitute an essential contribution in the constitution of the data necessary to the study. In a case as in the other, human action is necessary what generates several constraints such as the safety and the difficulties in working on road strongly circulated.

Considering this report, the LCPC proposed to use the optical observatory of trajectories (ODT) to deliver origins / destination matrix for the road noise study on roundabout, within the framework of the ISAUr project (Picaut, 2009). The results are very promising and an adaptation of this ODT is under development thanks to OSEO funding.

Keywords: visual tracking, vehicle trajectory, particle filter, MCMC, O/D matrix, roundabout.

1. Contexte

Le logiciel ISAUr (Picaut, 2009) développé par le RST permet de modéliser l'impact sonore d'aménagements urbains routiers (chicanes, rétrécissements de chaussée, changements de revêtement...). Cet outil repose sur le couplage d'un modèle de trafic (permettant d'obtenir la signature cinématique d'un véhicule aux abords d'un aménagement urbain), avec des modèles d'émission acoustique de véhicules routiers, ainsi qu'avec des modèles de propagation acoustique en champ libre. Ce travail va permettre de comparer les mesures de bruit avec le trafic pratiqué dans un giratoire. Il contribuera donc à concevoir le modèle d'impact sonore d'un giratoire du logiciel ISAUr.

L'article est organisé en 6 sections : (2) présente le système de mesure qui a été adapté au cas du giratoire, (3) présente le cadre probabiliste proposé pour résoudre le problème de suivi, (4) décrit en détail la fonction de vraisemblance utilisée, (5) donne les résultats quantitatifs et qualitatifs des expérimentations, (6) conclut sur les perspectives d'une adaptation industrielle de cet ODT.

2. Le système de mesure

2.1 Le système d'acquisition

L'outil d'acquisition a été choisi pour permettre un mesure globale des trajectoires des véhicules circulant tout autour du giratoire et donc d'identifier l'entrée et la sortie de chaque véhicule. Le capteur idéal est donc ici une caméra équipée d'une optique ayant un champ de vue très large, dite " fish-eye " (œil de poisson). Cette caméra VGA a été installée au centre du giratoire et en haut d'un mât de 10 mètres. Les séquences d'images étaient enregistrées à la fréquence de 15 images/seconde et périodiquement toutes les 5 secondes, pendant une durée de 2 minutes.

Toutes les vidéos étaient datées et conservées sur un serveur situé à la base du mât haubané. La figure 1 montre l'installation sur le giratoire de Lorient.

Figure 1 - Instrumentation au centre du giratoire.

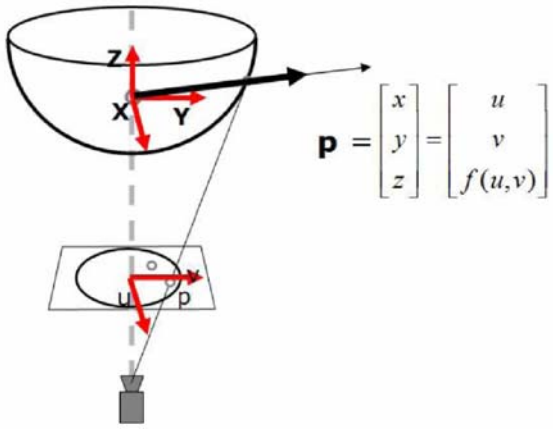


Figure 2 - Schéma et équation régissant la relation entre l'image sur le CCD de la caméra et l'image réfléchi sur le miroir.

L'objectif hypergone est un objectif spécial ayant une distance focale très courte et donc un angle de champ très grand, jusqu'à 180 degrés dans la diagonale, voire dans toute l'image. Contrairement aux objectifs classiques, il n'est pas corrigé contre la distorsion et donne des images déformées : toutes les lignes droites qui ne passent pas par le centre optique sont fortement courbées. On ne peut retrouver les angles qu'en projetant l'image sur un écran sphérique. Le calibrage d'un tel objectif implique d'identifier une relation entre un pixel p donné (2D) et le vecteur P (3D) réfléchi du miroir de l'objectif (figure 2).

Ce modèle peut être simplifié de la manière suivante :

$$P = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u \\ v \\ f(\rho) \end{pmatrix}, \rho = \sqrt{u^2 + v^2}$$

et (1)

$$f(\rho) = a_0 + a_1.\rho + a_2.\rho^2 + a_3.\rho^3 + \ldots$$

Pour résoudre l'équation 1 et donc rendre négligeable les effets de distorsion inhérent au système optique, nous avons utilisé un algorithme développé par Scaramuzza et al. (2006). Une fois les images détordues, l'étape suivante a consisté à les calibrer dans le référentiel GPS (figure 3).

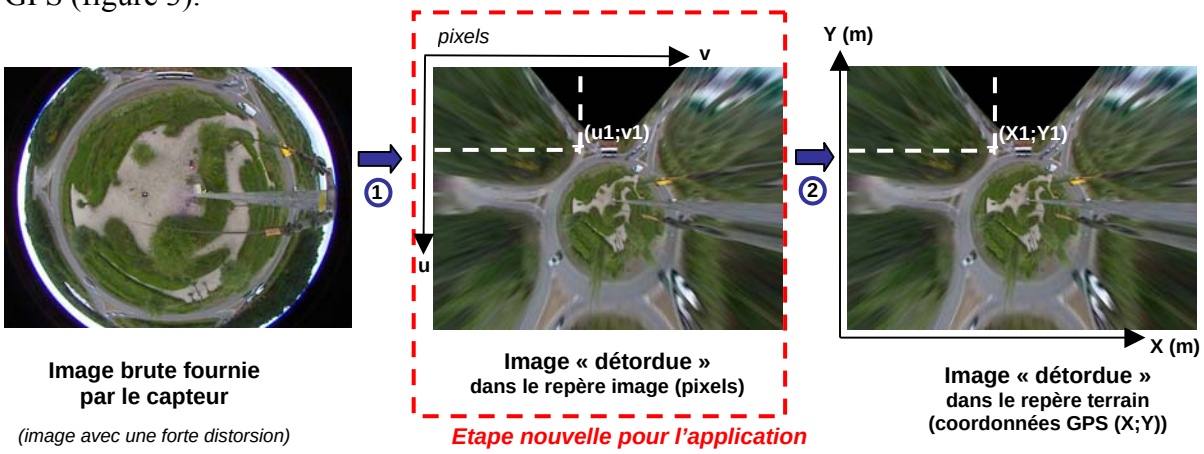


Figure 3 – Illustration des deux étapes nécessaires pour réaliser le calibrage de la scène de mesure.

Le principe consiste à déplacer une antenne GPS dans la scène de mesure et de synchroniser les enregistrements des images avec la position GPS mesurée. Le système GPS utilisé est précis à quelques centimètres près. Les étapes de calibrage sont illustrées dans la figure 4.

Une fois les équations posées, une matrice de passage est calculée permettant de convertir tous les pixels de l'image en coordonnées GPS et inversement. A ce stade les images peuvent donc être utilisées comme les mesures d'un capteur étalonné.

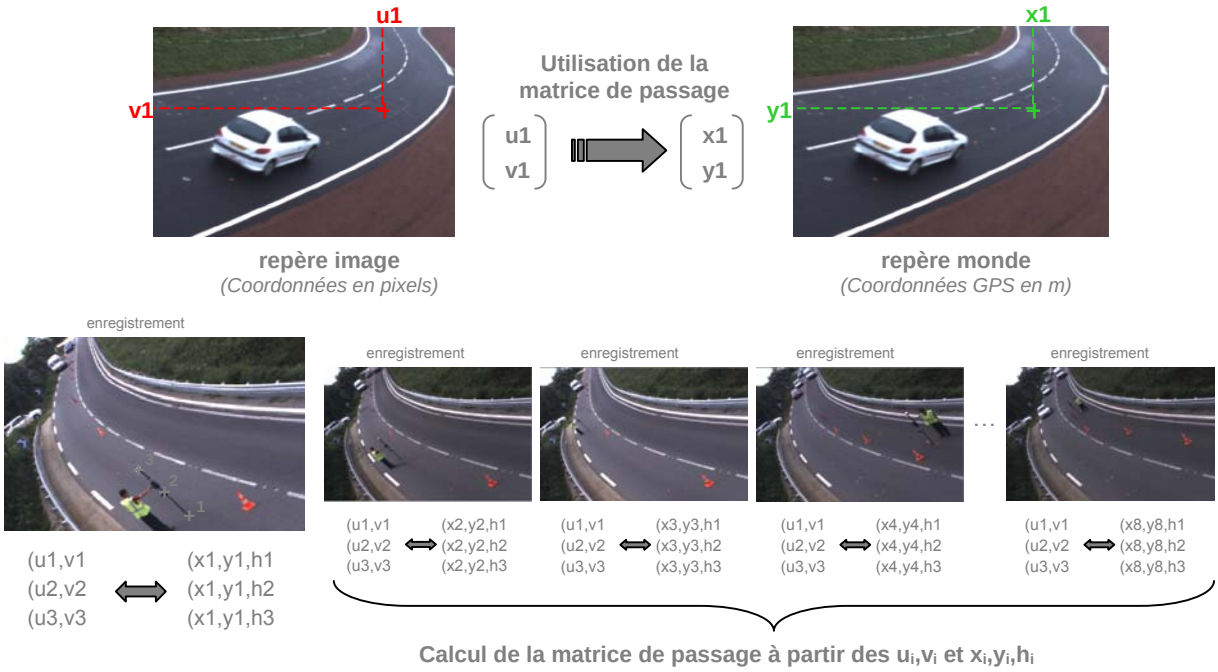


Figure 4 – Etapes de calibrage manuel pour calculer la matrice de passage entre l'image et le référentiel GPS.

3. Méthode proposée

Cette section décrit la méthode de suivi des véhicules, basée sur un cadre probabiliste. La figure 5 représente une illustration de l'algorithme. Etant donné une séquence vidéo et un état initial ($X^{(0)}$), la méthode échantillonne la distribution *a posteriori* de la trajectoire, en utilisant une méthode aléatoire de type Markov Chain Monte Carlo (MCMC). Nous présentons tout d'abord le vecteur d'état associé au modèle de trajectoire, puis nous donnons une vue générale de l'algorithme MCMC utilisé pour échantillonner la distribution *a posteriori*. Le processus de génération de chaque nouvelle proposition est détaillé dans une dernière partie.

3.1 A priori sur les commandes du conducteur

Le modèle de conducteur choisi prend en compte l'angle de braquage des roues avant et la vitesse du véhicule, déduit de son accélération longitudinale. En giratoire, les lois de commande régissant le conducteur d'un véhicule léger peuvent être modélisées en tournant le volant à droite, tout en accélérant quand il rentre dans l'anneau, puis rapidement en tournant le volant à gauche pour y faire le tour à une vitesse constante, pour enfin tourner à droite pour en sortir. L'angle de braquage et l'accélération sont représentés à la figure 6.

Sept paramètres sont alors nécessaires pour reconstruire ces deux profils et les équations sont les suivantes :

En angle de braquage :

$$\text{si } t \le B, y = \left(\frac{C-A}{B}\right).t + A, \text{sinon si } t > B, y = C,$$

$$\text{sinon } y = \left(\frac{A_C}{E-D}\right).(t-D) + 3$$

En accélération :

$$\text{si } t \le G, y = \left(\frac{-F}{G}\right).t + F,$$

$$\text{sinon } y = 0$$

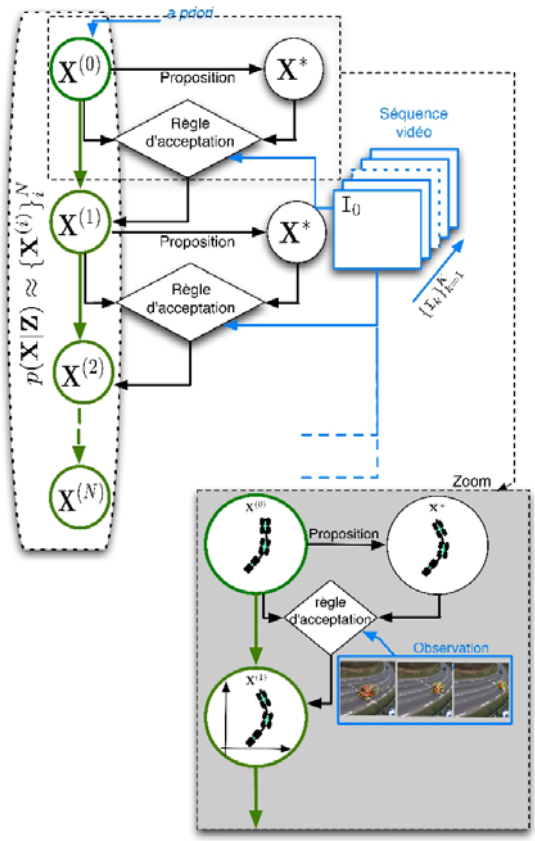


Figure 5 – Exemple d'une séquence vidéo et d'un vecteur d'état initial donnés. La méthode utilise une méthode probabiliste (MCMC) pour identifier la trajectoire la plus probable. Avec X l'état, Z les mesures et K le temps total. Le zoom illustre les phases de proposition et d'acceptation de la méthode.

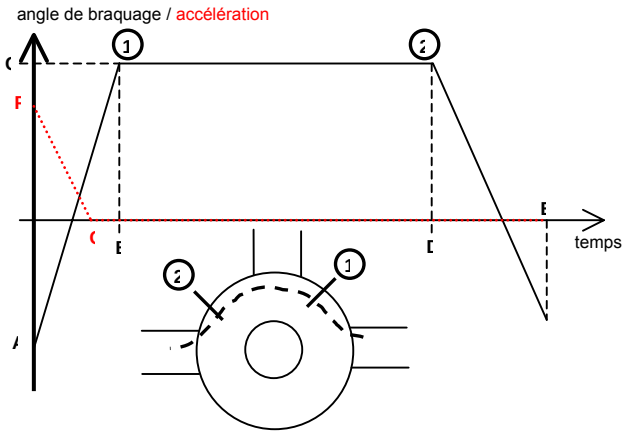


Figure 6 – profils d'angle de braquage et d'accélération en giratoire.

Pour modéliser le véhicule, nous utilisons un modèle cinématique simple, décrit dans la section 4.1. Ce modèle permet de générer itérativement x_k, y_k et α_k, à chaque instant k.

L'état associé à une trajectoire de véhicule est représenté par le vecteur d'état $X \doteq (l, \theta)^T$ avec:

- $l \doteq (x_0, y_0, \alpha_0)$ représente la position initiale et l'orientation du véhicule (dans le référentiel du monde réel).
- $\theta \doteq (A...G)$ sont les paramètres des deux profils représentant l'évolution temporelle discrète de l'angle de braquage et de l'accélération

3.2 MCMC (Markov Chain Monte Carlo)

Nous voulons estimer $p(X/Z)$, la densité de probabilité *a posteriori* de l'état **X**, connaissant les données observées **Z**. Les méthodes de Monte-Carlo proposent d'approcher les distributions *a posteriori* par un ensemble de N échantillons selon :

$$p(X/Z) \approx \sum_{n=1}^{N} \pi_n \delta(X - X^{(n)})$$

où δ est une fonction de dirac et π_n représente le poids associé à $X^{(n)}$ de manière à avoir $\sum_{n=1}^{N} \pi_n = 1$. L'échantillonnage de $p(X/Z)$ est un problème difficile et de nombreuses méthodes ont été développées pour tenter de le résoudre. La règle de Métropolis-Hasting peut être utilisée pour construire une chaîne de Markov, laquelle fait une approximation de la distribution *a posteriori* $p(X/Z)$. Une estimation de l'état est fournie en appliquant à l'ensemble des particules un maximum de vraisemblance :

$$\hat{X} \doteq \arg\max_{X^{(n)}} p\left(Z / X = X^{(n)}\right)$$

La méthode MCMC est détaillée dans l'article de Goyat et al. (2010).

4. Observation

Cette section présente la fonction d'observation définie pour calculer cette vraisemblance $p(Z/X) = X^{(n)}$, correspondant à la probabilité d'observer la séquence vidéo, connaissant l'échantillon $X^{(n)}$. La figure 7 illustre la procédure d'observation. Un ensemble discret de positions de véhicule est généré dans la séquence vidéo, à partir de l'échantillonnage de la trajectoire **X**. Un modèle générique 3D du véhicule est alors projeté dans chaque image, puis comparé à une cartographie fond/forme **Z** de la séquence vidéo. Une mise en œuvre efficace de la fonction de vraisemblance a été développée, grâce à l'utilisation d'une image intégrale par ligne, permettant ainsi de diminuer le temps de calcul.

4.1 Construction d'un ensemble discret de positions de véhicule

Soit χ définissant un ensemble discret de positions et d'orientations du véhicule dans le temps, associé au vecteur **X** de la distribution *a posteriori* :

$$\chi \doteq \{X_k\}_{k=1}^{K}$$

avec $X_k = (x_k, y_k, \alpha_k)^T$ un vecteur fournissant la position et l'orientation du véhicule à l'instant *k* dans le référentiel du monde réel $\Re_w$, en faisant l'hypothèse d'un monde plan. x_k peut être calculé de manière récursive, en utilisant un modèle cinématique simple de véhicule.

Ici, nous avons choisi le modèle bicyclette (figure 8)

$$x_k = x_{k-1} + T.v_{k-1}.\cos(\alpha_{k-1})$$
$$y_k = y_{k-1} + T.v_{k-1}.\cos(\alpha_{k-1})$$
$$\alpha_k = \alpha_{k-1} + T.\frac{v_{k-1}}{L}.\tan(\delta_{k-1})$$

avec *T* le temps d'échantillonnage de l'acquisition vidéo et *L* représentant la longueur de l'essieu du véhicule (distance entre les roues avant et arrière). δ_k et v_k sont calculés grâce aux profils de vitesse et d'angle de braquage présentées dans la section 3.1.

La fonction de vraisemblance $p(Z/X)$ peut s'écrire :

$$p(Z/X) = (Z_1; Z_2; ..., Z_K / X_1; X_2; ...; X_K)$$

Et les variables aléatoires sont indépendantes : $p(Z/X) = \prod_{k=1}^{K} p(Z_k / X_k)$.

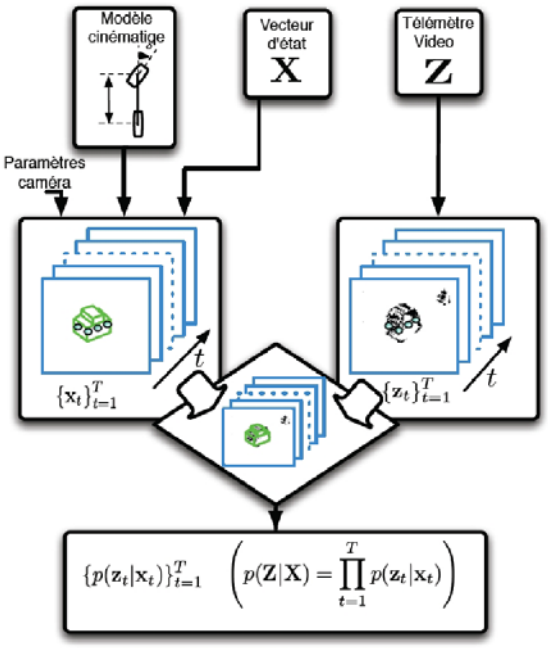


Figure 7 - Illustration de la fonction de vraisemblance : un jeu discret de positions de véhicule est généré dans la séquence vidéo, à partir de l'échantillonnage de la trajectoire. Un modèle générique 3D de véhicule est alors projeté dans chaque image, puis comparé à une carte fond/forme de la séquence vidéo.

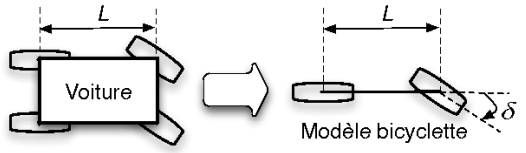


Figure 8 - Le modèle bicyclette réduit le déplacement d'un véhicule à 2 roues reliées par un axe rigide de longueur L.

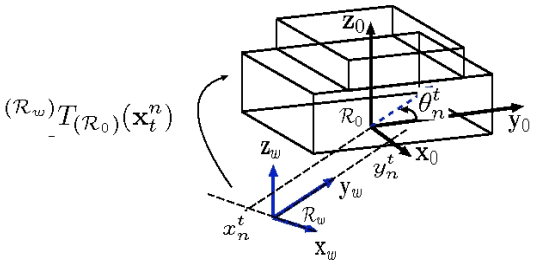


Figure 9 – Exemple d'un modèle géométrique tridimensionnel simple de véhicule, composé de deux cubes

4.2 Calcul de $p(Z_k / X_k)$

Les séquences vidéos provenant d'une caméra statique, l'extraction des objets mobiles (véhicules) peut être effectuée grâce à une méthode dite de soustraction fond/forme. Pour cela, nous utilisons une méthode non paramétrique (Goyat, 2006), basée sur une modélisation discrète probabiliste de la couleur d'un pixel. L'algorithme fournit un ensemble d'images binaires $\mathrm{I} \doteq \{I_k\}_{k=1}^{K}$ avec $I_k(u) = 1$ si le pixel $u \doteq (u_x, u_y)^T$ est considéré appartenir à la forme et $I_k(u) = -1$ si le pixel est considéré appartenir au fond. Un modèle géométrique simplifié tridimensionnel de véhicule est utilisé, comme illustré sur la figure 9. Ce modèle est composé de deux parallélépipèdes superposés. Soit $M^{(R_0)} = \{M_i^{(R_0)}\}_{i=1,\ldots,N_M}$ représentant l'ensemble des coins des cubes du modèle, exprimés dans un système de coordonnées associé au modèle $\Re_0$. Ce système de coordonnées est choisi comme ayant chacun de ces trois axes parallèles aux axes du système de coordonnées du référentiel du monde réel $\Re_w$.

Chaque point du modèle de véhicule est ensuite projeté dans les images et un poids lui est associé en fonction du nombre de pixels formes présents à l'intérieur de son enveloppe convexe. Pour optimiser les temps de calcul, nous utilisons une image intégrale des points formes, qui consiste à cumuler, par ligne, le nombre de points formes. Pour calculer le nombre total de points formes inclus dans l'enveloppe convexe, il suffit alors de soustraire chaque valeur située sur la partie droite du contour de l'enveloppe convexe aux valeurs situées sur la même ligne, mais sur son contour gauche. La figure 10 décrit le principe de calcul de la vraisemblance dans une image intégrale.

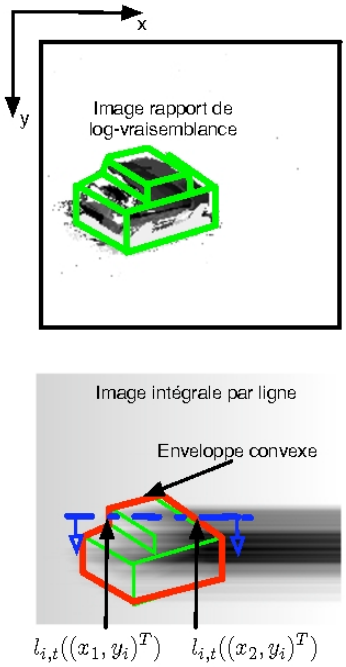


Figure 10 – Modèle 3D du véhicule (en vert ou en clair) reprojeté dans l'image issue de l'extraction fond-forme. Cette projection est approximée par son enveloppe convexe (en rouge ou en sombre). Le calcul de la vraisemblance s'effectue dans une image intégrale par ligne de rapport de log vraisemblance.

Figure 11 – Exemple de suivi effectué grâce à la méthode MCMC.

5. Validation expérimentale

Dans cette section, notre approche est comparée à une méthode visuelle. La méthode permettant de suivre les véhicules un à un, il suffit de détecter le début et la fin de chaque trajectoire pour identifier l'entrée et la sortie du giratoire (figure 11). Pour ces premiers tests et pour se simplifier la tâche, l'algorithme détecte les poids lourds mais ne les suit pas. Tous les autres véhicules sont suivis de la même manière, sans distinction de taille.

5.1 Détails de l'expérimentation

Initialisation

Le premier élément de la méthode MCMC doit être initialisé selon les *a priori*. Pour cela, nous utilisons une méthode non paramétrique de type noyau pour initialiser la position du véhicule sur la route (x_0, y_0). Cette méthode (Goyat, 2006) est appliquée aux images fond/forme I_0. Les autres paramètres sont initialisés en fonction des hypothèses faites sur le véhicule et sur le type de conduite.

Propositions

Un des points clef de cette méthode réside dans la stratégie adoptée pour contrôler les variations des paramètres de la méthode. L'application de suivi de véhicule sur une route étant relativement contrainte (sens de circulation, largeur de la route,...), des bornes peuvent facilement être fixées à chaque paramètre. Nous avons donc choisi d'utiliser une loi Beta pour faire varier ces paramètres :

$$P\left(X_m^* / X_m^{(n)}\right) \alpha \left(X_m^*\right)^{\xi_1 - 1} . \left(1 - X_m^*\right)^{\xi_2 - 1}$$

Les paramètres ξ_1 et ξ_2 sont calculés afin que le maximum de la distribution soit obtenu pour $X_m^* = X_m^{(n)}$.

Méthode visuelle

Le comportement de la méthode proposée est comparé à une méthode visuelle. Nous avons choisi une séquence sur laquelle circulaient des véhicules de tout type et avec un niveau de trafic variable. La méthode a consisté à regarder, véhicule par véhicule, le parcours effectué. Cinq catégories de véhicules sont différentiées : les véhicules légers (VL), les camionnettes (VAN), les camping-cars (CC) et les poids lourds (PL). La séquence vidéo choisie ne comportant pas de deux roues, cette catégorie n'a pas été considérée. Ces catégories serviront à une phase de validation ultérieure. Pour cette première phase de validation, nous rassemblons tous les véhicules hors PL dans la même catégorie et nous ne prenons pas en compte les PL.

5.2 Résultats

Tous les essais présentés dans cette partie ont été réalisés avec 250 particules, c'est-à-dire avec 250 explorations de trajectoires différentes pour chaque véhicule à suivre. La trajectoire retenue pour chaque véhicule est celle qui a obtenue le poids le plus fort. Une centaine de véhicules ont été traitées.

Le tableau 1 récapitule les taux de sorties, en fonction du nombre de véhicules détectés à chaque entrée, entre la méthode de suivi automatique, de type MCMC (en gras) et l'observation visuelle du giratoire. Les colonnes du tableau représentent les 5 entrées du giratoire et les lignes représentent les 5 sorties (figure 11).

Tableau 1 – Comparaison de la matrice OD calculée visuellement et automatiquement (gras).

Entrée/ Sortie	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
1	12% **10%**	3% **1**%	10% **11%**	10% **9%**	18% **14%**
2	18% **20%**	20% **24**%	0% **0%**	13% **15%**	23% **29%**
3	30% **32%**	15% **17**%	21% **19%**	2% **1%**	8% **12%**
4	12% **16%**	26% **20**%	35% **26%**	3% **1%**	3% **0%**
5	28% **22%**	35% **38**%	34% **44%**	72% **74%**	49% **45%**

Ces premiers résultats sont encourageants mais il faudra les confirmer sur un panel plus important de véhicules et selon différentes configurations de giratoire. Les erreurs sont dues principalement au masquage intégral d'un véhicule par un autre sur une longue portion du giratoire. Ce problème de perspective pourrait être résolu en combinant plusieurs caméras, mais le système serait alors beaucoup plus lourd à mettre en œuvre.

6. Perspectives et conclusion

Le LCPC travaille sur la problématique de l'estimation de trajectoires par vision depuis 2005, en collaboration avec le Lasmea. Dans ce cadre, un brevet, nommé observatoire de trajectoire a été déposé, avec une extension internationale envisagée. D'autre part, deux briques logicielles liées à l'estimation des trajectoires de véhicules sont également en cours de dépôt.

Ces protections constituent un atout important dans le cadre de l'exploitation envisagée dans ce projet.

Un projet financé par OSEO a commencé en janvier 2010 pour transférer cette connaissance au milieu industriel, avec le concours de société SORMEA. En effet, le principe de la délivrance de matrices origine / destination par l'intermédiaire d'une unique caméra pointée sur un carrefour giratoire est une " première ". Outre la forme finale des résultats (matrices O/D), l'innovation se situe également dans la possibilité d'adaptation du produit pour répondre à différentes géométries de carrefour. L'interface homme-machine du logiciel d'initialisation et de paramétrage du produit sur le terrain fera appel à un dispositif particulier de GPS embarqué dans un véhicule dont le parcours sera filmé par le produit.

Remerciements

Ces recherches ont été menées dans le cadre du projet ANR DIVAS (Dialogue Infrastructure - Véhicules pour Améliorer la Sécurité routière). L'objectif du projet DIVAS est de bâtir une conception globale de système d'échanges infrastructure-véhicules efficace en termes de sécurité routière, et d'en préparer le déploiement en examinant toutes les conséquences, notamment en termes technologiques mais aussi sur les plans de la crédibilité et de l'acceptabilité (http ://or.lcpc.fr/divas-fr/).

Références

- Goyat, Y., Chateau, T., et Bardet, F. (2010), « Méthode spatio-temporelle MCMC pour l'estimation des trajectoires de véhicule », RFIA.
- Picaut, J., Leclercq, L., Lelong, J. et Chervet, G. (2009), "ISAUr : an integrated tool for modelling the noise impact of urban traffic control equipments", *INTERNOISE*.
- Scaramuzza, D., Martinelli, A., et Siegwart, R. (2006), "A toolbox for easy calibrating omnidirectional cameras".
- Goyat, Y., Chateau, T., Malaterre, L., et Trassoudaine, L. (2006), "Vehicle trajectories evaluation by static video sensors", 9th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems.

VERS UN MODÈLE PROACTIF POUR IDENTIFIER DES RISQUES DE TRAFIC

M-H. PHAM **A. BHASKAR** **A-G. DUMONT**

Laboratoire des voies de circulation, ENAC
École Polytechnique Fédérale
Lausanne, Suisse

Résumé

Notre objectif est de développer des modèles permettant d'identifier les risques de circulation sur les autoroutes en utilisant des données de trafic désagrégées, des données météorologiques et une base de données d'accidents. Le site d'étude retenu est un tronçon de l'autoroute A1 se 2x2 voies situé à Urtenen-Schönbühl, en Suisse. Nous définissons les situations de trafic - SiT, qui représentent l'état du trafic pour une durée de temps déterminée et les scénarios de trafic - ScT obtenus par le regroupement des SiT normales. Les modèles sont basés sur des ScT et sont développés à l'aide des arbres de classification et régression permettant d'identifier les risques de collision frontale-arrière. L'interprétation des résultats montre que les variations de vitesse sur la voie de gauche et la différence des vitesses entre deux voies sont les deux causes principales de ce type de collisions.

Mots-clés : sécurité autoroutière, prévention d'accident, modèle d'identification des risques de circulation.

Abstract

Our goal is to develop motorway traffic risks identification models using disaggregate traffic data, meteorological data and crash database for a study site at a two-lane-per-direction section on motorway A1 in Urtenen-Schönbühl, Switzerland. We define traffic situations - TSs representing traffic status for a certain time duration and traffic regimes - TRs obtained by clustering TSs. The models are traffic regimes – based and are developed using classification and regression trees to identify rear-end collision risks. Interpreting results shows that speed variance on the left lane and speed difference between two lanes are the two main causes of rear-end crashes.

Keywords: Motorway safety, accident prevention, traffic risk identification model.

1. Introduction

L'objectif de notre recherche vise à calibrer et vérifier des modèles pouvant traduire différentes caractéristiques du trafic en probabilité de risques. Les caractéristiques du trafic sont estimées à partir de données désagrégées mesurées par des capteurs à doubles boucles inductives installées sur l'autoroute et à partir de données météorologiques. Une base de données d'accidents est aussi employée permettant d'extraire des situations pré-accidentelles qui sont des situations risquées se terminant en accidents.

Le travail mené vise à développer une méthodologie pour identifier les risques du trafic autoroutier en temps réel. Nous mettons l'accent sur les risques de collisions frontales-arrières qui représentent 21% de tous les accidents - le deuxième plus nombreux après les accidents impliquant un seul véhicule qui eux représentent 53% de tous les accidents. Si des situations risquées pouvaient être reconnues, des mesures préventives pourraient sans doute être prises par les opérateurs du trafic avant que ces situations-là n'aboutissent à un accident.

2. L'état de l'art

Pour les autoroutes, la sécurité de la circulation est importante, car si un accident survient les conséquences peuvent être très sévères en raison des vitesses élevées pratiquées. Parmi les nombreuses recherches entreprises pour améliorer la sécurité routière, certaines utilisent des mesures de flux de trafic pour quantifier la probabilité d'accident.

Les modèles probabilistes ont été présentés dans (Golob, Recker et al. 2008) pour traduire les mesures de flux de trafic en matière de sécurité. Des données sur les accidents et sur les flux de trafic sont collectées à partir de six autoroutes principales d'Orange County en Californie. Les caractéristiques d'accidents comprennent le type de collision, le facteur de collision, le nombre de véhicules et d'autres parties concernées, le mouvement de chaque véhicule avant la collision, le lieu de la collision, l'objet heurté par chaque véhicule, le nombre de blessés et les conditions environnementales. Les données de trafic fournies par des capteurs de trafic à seule boucle répartis sur chaque voie autoroutière contiennent le volume et l'occupation de chaque voie pour des intervalles de 30 secondes. Les données de trafic récoltées pendant 20 minutes avant chaque accident sur le capteur le plus proche du lieu de l'accident sont utilisées pour calculer six types de paramètres : les coefficients de variation, les corrélations des conditions de circulation à travers les voies, l'auto-corrélation (par rapport à l'intervalle précédant), les moyens et les écart-types du volume et de la vitesse produisant 36 paramètres. En appliquant l'analyse en composantes principales, huit facteurs qui sont des combinaisons linéaires des 36 paramètres sont choisis. Sur la base des "charges" de chaque paramètre, les paramètres les plus importants pour chacun de huit facteurs sont identifiés. Chaque facteur avec ses paramètres importants est interprété pour représenter une situation concrète. Les huit facteurs sont utilisés dans des modèles de régression logistique pour détecter les relations entre les facteurs, leurs interactions de second degré et les probabilités de survenue d'un événement avec quatre caractéristiques d'accident : gravité d'accident, type de collision, lieu de collision, et nombre de véhicules impliqués. Les résultats et les analyses montrent que les auteurs ont réussi à identifier les facteurs qui influencent les différentes caractéristiques des accidents.

La probabilité des accidents est aussi estimée par (Oh, Oh et al. 2001) en utilisant un réseau de neurones probabilistes (PNN), calibré grâce à des données de trafic agrégées de 10 secondes (débit, occupation, et vitesse). Ces données sont ensuite agrégées à nouveau pour

des intervalles de 5 minutes. Six variables candidates sont considérées : les moyennes et les écarts types de l'occupation, du flux et de la vitesse. Afin de sélectionner les variables d'entrée du PNN et d'apprendre les PNN, sont extraites deux ensembles de données du trafic des périodes de 5 minutes représentant les conditions de circulation normales et dangereuses. Pour chaque accident, les données de 5 minutes du trafic 30 minutes avant l'accident sont extraites pour représenter la condition de circulation normale. Les données du trafic pour l'intervalle de 5 minutes juste avant l'accident sont extraites pour représenter la condition de danger. Les auteurs suggèrent que la variation de vitesse est la cause principale des accidents.

Une autre étude similaire et plus récente réalisée par (Pande and Abdel-Aty, 2005) étend l'utilité des données agrégées de 30 secondes et collectées sur environ 52 km d'une autoroute à Orlando sur une période de plus de cinq ans (1999-2005). Les observations sont faites sur des conditions de trafic données par cinq capteurs situés autour d'un accident. Pour un accident, les cinq capteurs concernés sont d'abord déterminés : le capteur le plus proche du lieu de l'accident désigné le capteur de collision ; deux capteurs en aval et deux autres en amont du capteur de collision. Ensuite, les données de 20 minutes avant l'accident sont extraites et sont considérées comme pré-accidentelles. Les situations normales sont aussi sélectionnées au hasard en se basant sur les données de cinq ans, sur un parmi 58 capteurs du trafic et sur une parmi deux directions de circulation. À partir de données des accidents, deux groupes d'accidents sont identifiés et deux modèles différents sont préparés pour les deux groupes d'accidents. Pour chaque accident, quatre intervalles de cinq minutes sont formés utilisant les données des cinq capteurs. Les données pour les cas normaux sont également établies de la même façon.

Les études dans (Oh, Oh et al. 2001; Pande and Abdel-Aty, 2005; Golob, Recker et al., 2008) ont également contribué à l'étude de sécurité routière. Toutefois, davantage d'améliorations peuvent encore être faites. Tout d'abord, le nombre de conditions normales (ou les cas normaux) choisi ne reflète pas la réalité : les conditions de circulation normales sont abondantes alors que les conditions de circulation menant aux accidents sont rares. Dans (Golob, Recker et al., 2008), il y a même pas de conditions normales considérées comme l'objectif de l'étude est de trouver des facteurs causant des différentes valeurs des variables comme le type d'accidents. On comprend que les conclusions de l'étude permettent le guide pour déterminer le type d'accident une fois le risque d'accident détecté. Cependant, il n'est pas mentionné la façon de détecter les risques. Dans (Oh, Oh et al., 2001), les conditions normales sont prises en compte. Cependant, le taux entre les conditions normales et les conditions dangereuses est de 1:1 – ce qui est trop pessimiste pour la sécurité routière. Le risque pour les modèles développés à être utilisés en temps réel est qu'ils classeraient de nombreuses conditions normales en des conditions dangereuses. Dans (Pande and Abdel-Aty, 2005), beaucoup plus des conditions normales sont choisies au hasard par rapport à l'étude dans (Oh, Oh et al., 2001). On notera d'une part qu'il n'y a aucune garantie que les conditions normales sélectionnées représentent toute la population des conditions normales. D'autre part, la comparaison entre les conditions pré-accidentelles avec des conditions normales choisies au hasard peut se traduire par la comparaison entre des conditions pré-accidentelles pendant des heures de pointe (par exemple, pointe du matin ou pointe du soir) avec des conditions post-accidentelles où des conditions de circulation pendant la nuit – ceci pourrait conduire à des erreurs dans l'utilisation des modèles. Deuxièmement, les données utilisées dans les études ci-dessus sont des données agrégées qui réduiraient la possibilité d'obtenir des facteurs corrects différenciant des cas normaux et des cas pré-accidentels. Les données agrégées récoltées des capteurs de trafic dans (Oh, Oh et al., 2001; Pande and Abdel-Aty, 2005; Golob, Recker et al., 2008) ont été ré-agrégées au moins une fois au niveau de la voie pour les intervalles de 5

minutes. Dans (Oh, Oh et al., 2001; Pande and Abdel-Aty, 2005), les données ont été agrégées une fois de plus au niveau des sections pour obtenir des paramètres comme la vitesse moyenne et la covariance de vitesse sur toutes les voies. Avec les multiples niveaux d'agrégation des données, la limite entre les cas normaux et les cas pré-accidentels devient plus floue. Bien que les résultats prometteurs sont signalés dans (Oh, Oh et al., 2001; Pande and Abdel-Aty, 2005), les modèles développés pourraient avoir un taux plus élevé de fausses alarmes lorsque plus de conditions normales sont prises en compte.

3. Site d'étude et méthodologie

3.1 Site d'étude

Trois types de données (trafic, météorologie, et accidents) sont utilisés dans la présente étude. Le site d'étude est sélectionné où trois types de données sont disponibles simultanément. Il s'agit d'un tronçon à 2x2 voies sur l'autoroute A1, en Suisse entre les villes de Berne et Zurich. Un poste de comptage automatique de la circulation routière désigné CH023 est disposé sur le site et comporte des capteurs à double boucles. Le poste de comptage peut fournir des informations spécifiques aux véhicules telles que l'heure, la voie, la vitesse, le temps inter-véhiculaire, la longueur et la catégorie de véhicule. Près du site d'étude (à environ 10 km), il existe une station météorologique qui collecte de données météorologiques pour toute la région. L'information provenant de la station météorologique que nous avons retenue est la précipitation cumulative par période de dix minutes.

La base de données des accidents contient plus de 40'000 enregistrements d'accidents pour l'ensemble du réseau autoroutier suisse de 2002 à 2007. Chaque enregistrement contient des informations sur un accident dont le moment de l'accident, la localisation (coordonnées GPS), le type de collision, l'état du conducteur, les conditions météorologiques, l'état de la chaussée, etc. Comme d'autres études dans (Oh, Oh et al., 2001; Pande and Abdel-Aty, 2005; Golob, Recker et al., 2008), les heures des accidents ne sont pas connues avec précision.

Pour notre recherche, seuls les accidents associés à la circulation dans un rayon d'un kilomètre de CH023 (pour les deux sens) sont sélectionnés. Cette sélection nous assure que l'évolution de la circulation avant l'accident est enregistrée par les capteurs du trafic. Les accidents causés par l'état anormal des conducteurs ou par des problèmes techniques du véhicule sont exclus de notre sélection. Après avoir éliminé les accidents non pertinents, il nous reste 121 accidents frontaux-arrières.

Pour améliorer la précision des heures d'accidents, nous vérifions l'évolution du trafic pour chaque accident et corrigeons l'heure de l'accident en fonction de la chute brusque de la vitesse enregistrée dans les données du trafic. Pour 47% des accidents, les heures ont été corrigées. Pour les autres accidents, la rupture de la vitesse n'est pas claire et donc nous avons gardé les heures des accidents telles qu'elles sont inscrites dans les registres d'accidents. Pour chaque accident, les données du trafic pour la période de 30 minutes juste avant l'accident sont extraites pour produire des situations pré-accidentelles.

3.2 Méthodologie

Définitions
Deux termes importants pour notre méthodologie sont à définir :

Situation de trafic SiT : est un ensemble d'informations liées au trafic et agrégées au cours d'une durée de temps, pour un sens de trafic et particularisant cinq propriétés retenus : l'instantanéité, l'état de chaque voie, l'écart de vitesses entre les voies de circulation, l'évolution du trafic par rapport à la SiT précédente, et les renseignements météorologiques du lieu.

Pour représenter ces cinq propriétés, des variables sont utilisés qui dépendent du nombre de voies. S'il y a deux voies sur le tronçon où se trouve le poste de comptage, alors 22 variables seront utilisées. La description de ces variables est donnée au Tableau 1.

On distingue deux types de SiT : les *SiT normales - SiTN* et les *SiT pré-accidentelles - SiTP*. L'explication de ces deux types est donnée à la Figure 1. Pour un accident, la plage accidentelle est une période comprenant l'évolution de trafic avant et après l'accident. La plage post-accidentelle n'est pas considérée car l'état du trafic peut y être anormal (par exemple, la fermeture de voies, le changement temporel de limite de vitesse, etc.). La plage pré-accidentelle 1 est utilisée pour générer des SiTP puisque ce sont des situations à risque qui a abouti à un accident. Pour bien séparer les SiTN et les SiTP, la plage pré-accidentelle 2 est aussi exclue de notre considération. Les SiTN sont générées dans les plages normales.

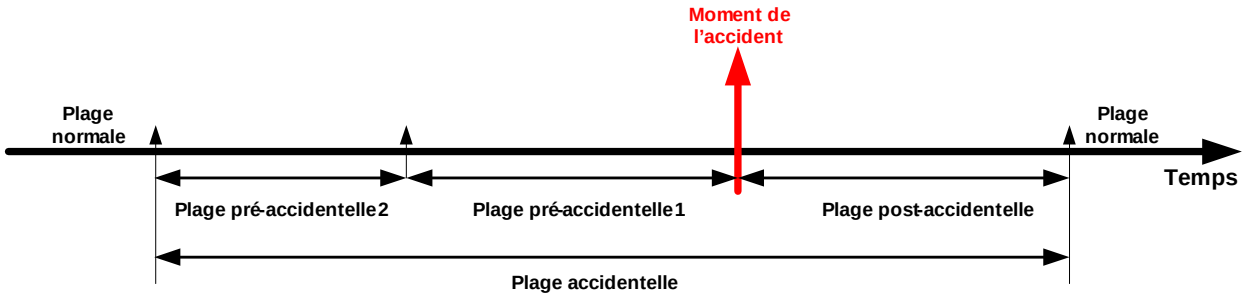


Figure 1 - Distinction entre plage normal et plage accidentelle

Tous les accidents sont traités pour s'assurer que l'ensemble de SiTN n'est pas inclus dans des plages accidentelles. Par contre, seules les SiTP des accidents frontaux-arrières sont utilisées à la construction des modèles présentés dans ce papier. Pour ce papier, les durées de temps pour plage post-accidentelle, plage pré-accidentelle 1, et plage pré-accidentelle 2 sont de 30 minutes chacune, donnant une plage accidentelle totale de 90 minutes. La durée de chaque SiT est de 5 minutes.

Scénario de trafic – ScT : est un groupe de SiT ayant des caractéristiques similaires en fonction de différentes variables de SiT. Des SiT sont regroupées en groupes de SiT. Les SiT de chaque groupe sont semblables les unes aux autres alors que les SiT d'un groupe sont différentes des SiT des autres groupes. Les groupes obtenus sont désignés ScT. Les ScT ont pour but de représenter des différentes conditions de circulation auxquelles les risques spécifiques peuvent être identifiés et prévenus. Dans ce papier deux termes « scénario » et ScT sont alternativement utilisés pour indiquer « scénario de trafic ».

Méthodologie

La figure 2 introduit la méthodologie de notre étude.

À partir des données brutes (trafic, météorologie, et accidents), des SiTN et SiTP sont générées. L'ensemble des SiTN est ensuite transformé par l'analyse en composantes principales - ACP. D'une part, cette transformation permet de réduire le nombre de

dimensions des données, facilitant le processus de regroupement à l'étape suivante. Le nombre de composantes principales les plus importantes à conserver est fixé à six, c.-à-d. les composantes dont les valeurs Eigen sont plus élevées que la valeur moyenne (qui est l'unité pour notre étude). Donc, l'ensemble des données utilisées par le processus de regroupement est donc à six dimensions. D'autre part, puisqu'il existe des corrélations entre des variables listées dans le Tableau 1, l'utilisation de l'ACP peut également faire se concentrer les données sur les composantes principales qui dominent la distribution de données. Les coefficients obtenus de cette transformation sont aussi employés à transformer l'ensemble des SiTP.

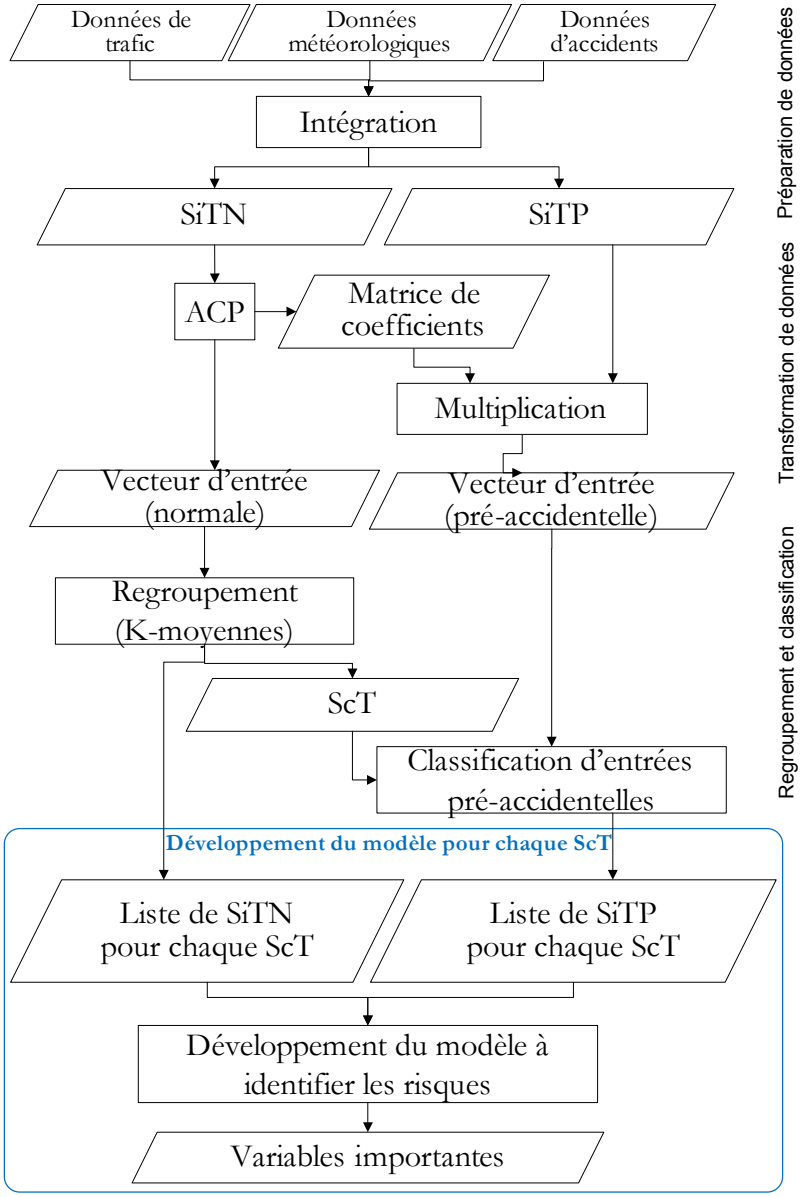


Figure 2 - Méthodologie de l'étude

Des ScT sont obtenus grâce au processus de regroupement des SiTN. La méthode K-moyennes est utilisée pour regrouper des SiTN. Le processus de regroupement résulte des groupes de SiTN similaires tels que chaque groupe est considéré comme un ScT.

Tableau 1: Variables utilisées pour définir les situations de trafic

Variable	Alias	Explication	Numérique/ Catégorial	Unité	Valeur	Spécification
X1	TDay	Heure du jour	Catégorial	-	De 1 à 7	Instantanéité
X2	WDay	Jour de la semaine	Catégorial	-	1 - 1440	
X3	LFlow	Débit sur la voie de droite	Numérique	Véhicule par heure (vph)	0 - 4000	État de voie droite
X4	LASpd	Vitesse moyenne sur la voie de droite	Numérique	Kilomètres par heure (km/h)	- 200.0	
X5	LAHw	Temps inter-véhiculaire (TIV) moyenne sur la voie de droite	Numérique	Second	0.0 - 100.0	
X6	LOcc	Occupation sur la voie de droite	Numérique	Percent (%)	0.0 - 100.0	
X7	LVHw	Écart-type du TIV sur la voie de droite	Numérique	Second	0.0 - 50.0	
X8	LVSpd	Écart-type de la vitesse sur la voie de droite	Numérique	Kilomètres par heure (km/h)	0.0 - 100.0	
X9	L% HV	Pourcentage de véhicules lourds sur la voie de droite	Numérique	Percent (%)	0.0 - 100.0	
X10	HFlow	Débit sur la voie de gauche	Numérique	Véhicule par heure (vph)	0 - 4000	État de voie gauche
X11	HASpd	Vitesse moyenne sur la voie de gauche	Numérique	Kilomètres par heure (km/h)	0.0 - 200.0	
X12	HAHw	TIV moyenne sur la voie de gauche	Numérique	Second	0.0 - 100.0	
X13	HOcc	Occupation sur la voie de gauche	Numérique	Percent (%)	0.0 - 100.0	
X14	HVHw	Écart-type du TIV sur la voie de gauche	Numérique	Second	0.0 - 50.0	
X15	HVSpd	Écart-type de la vitesse sur la voie de gauche	Numérique	Kilomètres par heure (km/h)	0.0 - 100.0	
X16	H%HV	Pourcentage de véhicules lourds sur la voie de gauche	Numérique	Pourcentage	0.0 - 100.0	
X17	Spd#	Différence des vitesses moyennes entre deux voies	Numérique	Kilomètres par heure (km/h)	-200.0 - 200.0	Écart entre deux voies
X18	LFCg	Différence des débits sur la voie de droite par rapport à la SiT précédant	Numérique	Véhicule par heure (vph)	-4000 - 4000	Évolution du trafic
X19	LSCg	Différence des vitesses moyennes sur la voie de droite par rapport à la SiT précédant	Numérique	Kilomètres par heure (km/h)	-200.0 - 200.0	
X20	HFCg	Différence des débits sur la voie de gauche par rapport à la SiT précédant	Numérique	Véhicule par heure (vph)	-4000 - 4000	
X21	HSCg	Différence des vitesses moyennes sur la voie de gauche par rapport à la SiT précédant	Numérique	Kilomètres par heure (km/h)	-200.0 - 200.0	
X22	Prec	Précipitation	Numérique	-	0 et 1	Renseignements météorologiques

Le nombre de ScT est fixé à huit. Pour chaque ScT, il y a un point central qui le représente. Avec les huit ScT nommés d'A à H, nous pouvons classer les SiTP pour finalement obtenir pour chaque ScT une liste de SiTN et une liste de SiTP. En appliquant l'arbre de classification et régression (la méthode *Classification and Regression Tree – CART* présentée dans la section suivante), on identifie des variables importantes à partir de 22 variables listées dans le Tableau 1. Les variables importantes aident à comprendre les causes principales des accidents.

Arbre de classification et régression - CART

Selon (Breiman, Friedman et al., 1984), CART est une méthode d'apprentissage supervisée qui fonctionne basé sur le partitionnement récursif d'un ensemble d'entrées caractérisées par des variables. À chaque partitionnement, les entrées sont divisées en deux parties disjointes et la division se base sur une variable décisive. Le partitionnement se termine quand tous les parties disjointes sont homogènes. L'ensemble initial des entrées est la racine de l'arbre binaire. Chaque nœud de l'arbre représente un sous-ensemble d'entrées. Les nœuds qui n'ont pas d'autre nœud au dessous sont les feuilles de l'arbre. Les sous-ensembles d'entrées aux feuilles sont les plus homogènes et ne sont plus divisible selon un critère de partitionnement prédéfini.

Pour chaque partitionnement, il est important de déterminer la variable décisive basé sur laquelle les entrées sont divisées et la valeur de la variable décisive qui donne la meilleure division. Pour un sous-ensemble à chaque nœud, il y a une mesure qui indique l'hétérogénéité de composition des entrées appelée l'«impureté» du nœud. Plusieurs méthodes peuvent être employées pour mesurer l'impureté. Dans notre recherche, on applique la classe *classregtree* implémenté dans MatLab par (Mathworks) où l'impureté I d'un nœud O est mesurée basée sur e(O) et p(O) qui sont l'erreur et la probabilité du nœud O respectivement. L'erreur du nœud O - e(O) est la variance des entrées au nœud O. Si les entrées au nœud O sont homogènes, e(O) est égale à zéro. La probabilité du nœud O - p(O) est la proportion des entrées branchées sur le nœud O. La probabilité du nœud racine est 1.0. L'impureté du nœud O est calculée selon l'équation suivant :

$$I(O) = e(O) * p(O)$$

Si I(O)=0, le sous-ensemble au nœud O est homogène et tous les entrées appartiennent à une classe de SiT, soit SiTN soit SiTP. Le point de division pour une variable est la valeur qui réduit le plus de l'impureté parmi les valeurs moyennes des pairs de valeurs consécutives pour la variable. La réduction de l'impureté donnée par la division au nœud O est calculée par la différence entre l'impureté du nœud O et les impuretés de deux nœuds enfants du nœud O. Une variable est désignée la variable décisive si son point de division réduit le davantage d'impureté par rapport aux points de division des autres variables.

Les impuretés aux feuilles sont les plus bases. Si le sous-ensemble à une feuille est homogène, la classe de la feuille est celle des entrées appartenant à la feuille. Si le sous-ensemble n'est pas homogène, la classe de la feuille est celle des entrées les plus nombreuses.

Dans le processus de partitionnement récursif, il y a des variables qui sont décisives à plusieurs nœuds et il y a des variables qui ne sont pas décisives à aucun nœud. Pour comparer les influences des variables au processus de repartitionnement, les importances des variables sont utilisées. L'importance d'une variable est la somme totale des réductions de l'impureté aux nœuds où la variable est décisive. L'importance d'une variable qui n'est pas décisive à aucun nœud est zéro. L'importance d'une variable est supérieure ou égale à zéro.

4. Résultats et analyses

4.1 Regroupement et classification

Les figures 3 (i) et (ii) montrent les nombres de SiTP et SiTN, respectivement, de chaque ScT. Le taux de risque (iii) est obtenu en divisant le nombre de SiTP par le nombre de SiTN.

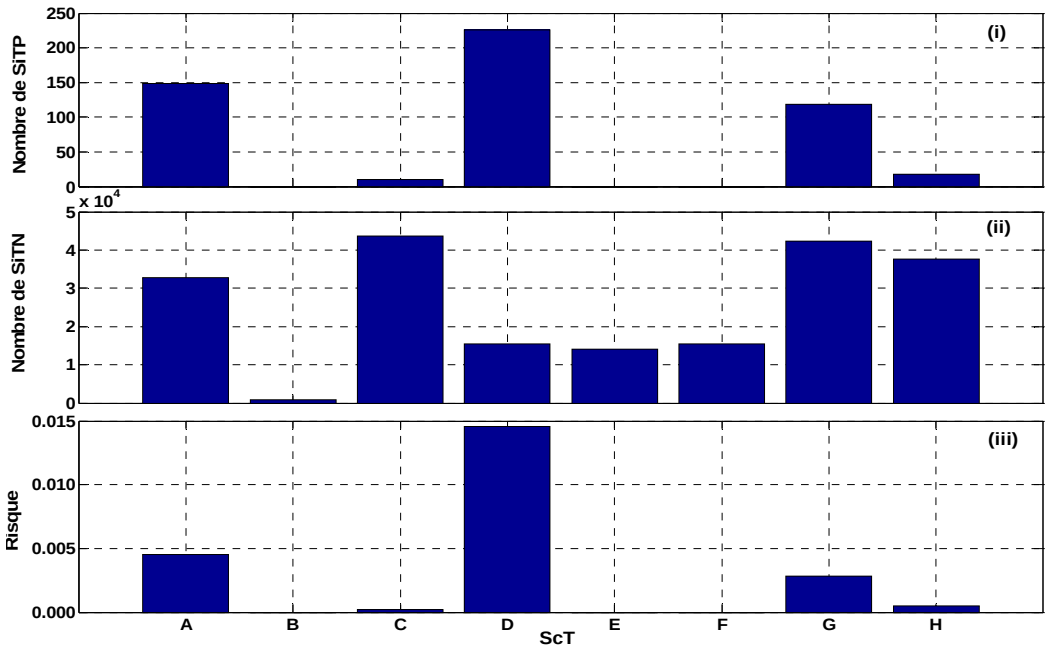


Figure 3 - Nombre de (i) SiTP et (ii) SiTN dans chaque ScT. Le taux de risque (iii) reflète le risque dans chaque ScT.

Le ScT D est le plus risqué car le nombre de SiTN dans ce ScT n'est pas élevé mais le nombre de SiTP est élevé. Si le trafic correspond à ce ScT, il y a plus de chance pour qu'une SiT devienne une SiTP.

Selon la figure 3 (i), les SiTP sont plus fréquentes dans les ScT A, D, et G. Il n'y a pas de SiTP pour ScT B, E, et F tandis que les nombres de SiTP pour ScT C et H sont faibles au niveau de l'importance statistique. Les ScT B, C, E, E, et H peuvent être déclarés à «faible risque». Trois modèles pour identifier des risques sont donc développés pour trois ScT : A, D, et G.

La figure 4 montre les SiT de trois ScT A, D, et G via le diagramme fondamental débit-vitesse sur la voie de droite. Vu que les SiT sont représenté par 22 variables, le débit et la vitesse sur la voie de droite montre partiellement la différence de ces trois ScT. Le ScT D contient les des conditions de circulation surchargées avec un débit élevé et une vitesse réduite. Par contre, les ScT A et D représentent les conditions de circulation très serrées avec une vitesse un peu réduite mais toujours haute.

Selon nos analyses des ScT qui ne sont pas introduites dans ce papier, voici les observations que nous pouvons noter :

- Les scénarios E, F et B représentent des conditions de circulation libre à faible débit sur la voie de droite avec un débit encore plus bas sur la voie de gauche. Dans le scénario E, les véhicules sur la voie de gauche sont rares.

- Les scénarios C et H représentent les conditions de circulation moyenne. Alors que le scénario H est plus susceptible d'être en circulation libre, le scénario C tend à représenter l'état d'un trafic plus dense.
- Les scénarios A et G représentent des conditions de circulation avec un débit élevé et les vitesses moyennes sont légèrement réduites par rapport aux scénarios E, F, B, C, et H.
- Le scénario D représente des conditions de congestion avec des débits élevés sur les deux voies et des vitesses moyennes plus bases. Le scénario D peut être désigné le «scénario congestionné".
- Il y a un pourcentage plus élevé de véhicules lourds sur les deux voies (représentés par deux variables X9 et X16) le scénario G qu'avec le scénario A.
- Le nombre de véhicules pour des situations de circulation sous le scénario A a tendance à diminuer par rapport aux situations antérieures (X18 et X20). Dans le même temps, la vitesse moyenne a tendance à augmenter (X19 et X21).
- La tendance des situations de circulation sous le scénario G est opposée à celle du scénario A : il y a davantage de véhicules qui arrive dans cette situation et la vitesse diminue.

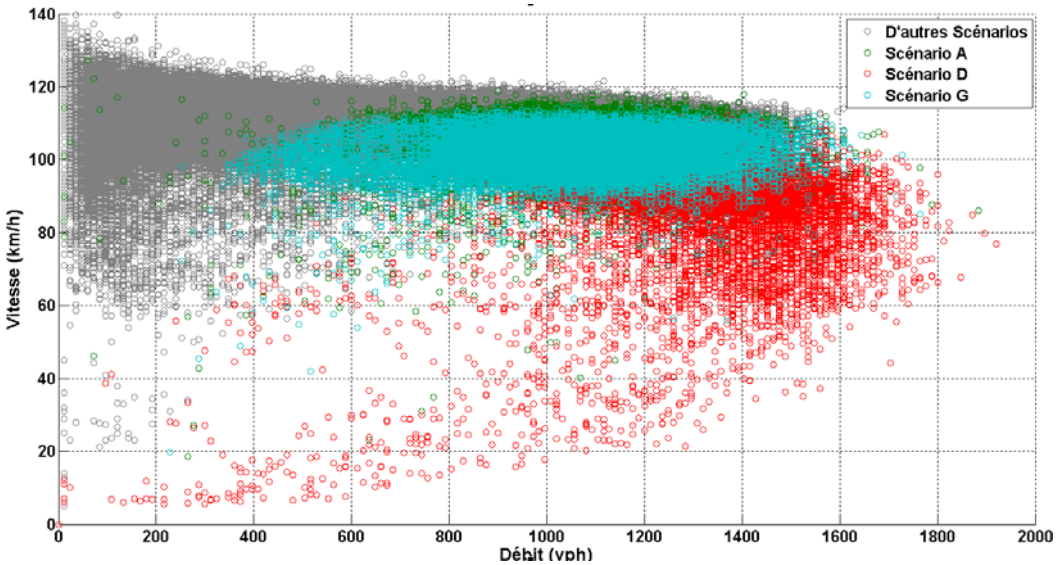


Figure 4 - Diagramme de débit-vitesse de voie de droite de trois scénarios A, D, et G

Parmi les trois scénarios les plus risqués ; A, D, et G, le scénario D représente des conditions congestionnées, le scénario A représente une transition de G à D et de D à G.

4.2 Modèles et résultats

Pour chaque scénario, on peut établir une liste de SiTP et une liste de SiTN. Trois modèles sont développés en utilisant 22 variables listées dans le Tableau 1 à l'aide de CART pour distinguer si une SiT est une SiTP ou une SiTN. Trois arbres ont été obtenus pour les trois scénarios A, D, et G. À cette étape de notre recherche, toutes les SiT sont utilisées pour calibrer les modèles et pour trouver les variables importantes.

Les résultats des modèles sont résumés dans le Tableau 2. Pour chaque ScT et chaque ensemble de SiT (soit SiTP soit SiTN), il y a trois chiffres : Totale, Identifiées, et Pourcentage qui sont respectivement le nombre totale de l'ensemble dans le ScT, le nombre de SiT correctement identifiées par les modèles et le pourcentage de SiT correctement identifiées.

Car les nombres de SiTP sont très faibles par rapport aux nombres de SiTN, la performance des modèles dans notre étude est évaluée selon deux critères : pourcentage de SiTP identifiées et pourcentage élevé de SiTN identifiées au lieu de pourcentage de SiT identifiées.

Tableau 2 - Résumé de résultats des modèles préliminaires

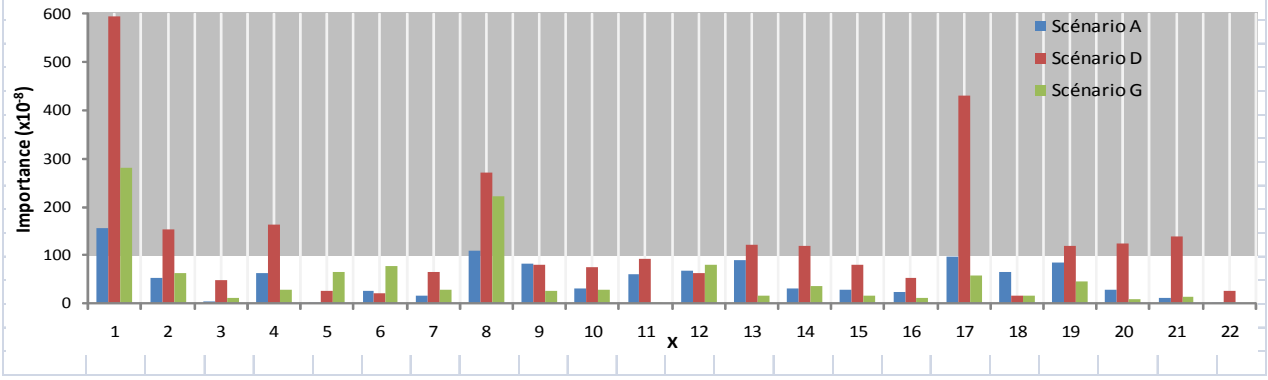
ScT	SiTN			SiTP		
	Totale	Identifiées	Pourcentage	Totale	Identifiées	Pourcentage
A	32874	32807	99.80%	106	106	100%
D	15509	15270	98.46%	273	273	100%
G	42400	42321	99.81%	107	107	100%

4.3 Analyses

Le tableau 3 présente les importances des variables pour les modèles de ScT A, D, et G en différenciant les SiTP et les SiTN.

Tableau 3 - Les importantes des variables (de X1 à X22) pour chaque scénario.

ScT	X ($_{x10^{-8}}$)																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
A	155.4	53.6	4.8	62.6	1.7	25.7	16.1	108.6	82.6	29.9	61.0	66.7	90.5	31.9	29.7	23.6	97.7	65.3	85.2	28.7	11.7	1.5
D	594.7	154.1	48.1	164.0	26.9	21.1	64.2	270.1	80.4	76.0	92.2	64.0	122.5	120.4	80.3	53.9	429.5	16.3	119.7	125.3	139.0	26.0
G	281.5	62.1	11.5	28.0	65.8	76.9	28.9	222.2	26.5	28.5	1.3	79.1	16.3	35.7	17.0	10.7	56.9	15.2	46.3	8.2	13.6	0.0
Ordre de l'importance:				1er	2e	3e	4e															



Pour faciliter l'interprétation des variables seules quatre variables, les plus importantes de chaque ScT, sont conservées. Le tableau 3 liste les quatre variables principales triées par importance descendante pour chaque scénario.

La variable X1 (l'heure du jour) est la plus importante pour les trois modèles. Selon notre analyse (pas incluse ici), il y a deux périodes du jour où des SiTP se concentrent : entre 6h00 et 10h00 le matin et entre 13h30 et 19h00 l'après-midi. Cette variable X1 apparaît aux nœuds racines de trois arbres pour bien séparer les deux tranches d'heures pour préparer les comparaisons des conditions de circulation dans la même tranche d'heures aux nœuds enfants.

Pour le scénario A, trois autres variables importantes sont X8 (variance de vitesse sur la voie de droite), X17 (la différence de vitesse entre deux voies), et X13 (occupation sur la voie de gauche). Dans tous les nœuds où la variable X8 est décisive, si on suit la branche à droite (donc la valeur de X8 est plus élevée), la chance pour une SiT de devenir SiTP est plus élevée et X8 est décisive 11 fois. Les branches à la droite des nœuds de X8 sont courtes et contiennent plusieurs feuilles indiquant SiTP. Les variables X17 et X15 sont décisives moins

souvent que X8 (6 et 5 fois, respectivement). X17 et X13 permettent de séparer une, deux ou trois SiTP particulières à partir de l'ensemble des SiT. Cette séparation peut être utile pour les données historiques mais serait probablement difficile à identifier les nouvelles données.

Pour le scénario D, après X1 - l'heure du jour, les variables X17 (différence des vitesses entre deux voies), X8, et X4 (vitesse moyenne sur la voie de droite) sont les plus importantes. Les valeurs élevées de X17 et X8 sont la cause d'environ 8.4% de SiTP pour le scénario D. Par contre, les valeurs négatives de X17 (qui représentent le fait que la vitesse sur la voie de droite est plus élevée que sur la voie de gauche) permettent aussi d'identifier 8.4% de SiTP pour le scénario D. X8 et X1 ensemble reconnaissent 60.7% de SiTN. Il s'agit pour ce scénario que la vitesse sur la voie de droite a une grande influence sur l'identification des SiTP avec X8 et X4 qui indiquent directement la vitesse sur la voie de droite ou X17 qui est dérivée de X4.

Pour le scénario G, trois variables importantes sont X6 (occupation), X8 et X12 (temps inter-véhiculaire moyen sur la voie de gauche) dont les deux premières sont les mesures sur la voie de droite. Il est reconnu que les valeurs élevées de X6 et X8 indiquent des situations plus risquées. Seule X8 avec une valeur plus grande de 26.18 km/h a pu identifier 21.7% des SiTP de ce scénario. Pour les SiT ayant X8 plus faible de 26.18km/h, la variable X12 qui représente le temps inter-véhiculaire moyen sur la voie de gauche est divisée en trois intervalles : de 0 à 1.35, de 1.35 à 1.69 et supérieur de 1.69. Pour l'intervalle de 0 à 1.35, le temps inter-véhiculaire est trop faible est le risque de collision frontale-arrière est élevé : 56%. Ce risque pour l'intervalle de 1,35 à 1,69 est de 2,8%, et pour l'intervalle supérieur de 1,69 est de 0.1%.

5. Conclusions et perspectives

Les résultats obtenus aujourd'hui ne sont qu'une étape intermédiaire de notre étude visant à développer une méthodologie d'identification automatique des situations à risque sur les autoroutes. Les premiers résultats portant sur les accidents frontaux-arrières montrent que les modèles proposés ont de bonne performance puisque des pourcentages élevés de SiTP et des SiTN sont identifiées. Cette définition de performance est différente que celle traditionnelle de CART qui ne compte que le pourcentage de toutes les SiT identifiées.

Partant de la bonne performance de nos modèles, nous pouvons interpréter les variables les plus importantes de chaque scénario. Selon l'importance des variables et avec des analyses plus détaillées faites pour chaque scénario, nous arrivons aux conclusions suivantes concernant les accidents frontaux-arrières :

1. La plupart des collisions se sont passées autour de deux heures de point du jour. En séparant ces deux tranches d'horaires, la comparaison des conditions de trafic dans chacune des tranches relève les raisons principales de collision.
2. La variation de vitesse sur la voie de droite – X8 joue un rôle important de séparation des SiTP. Pour la plupart des nœuds où X8 est décisif, la branche de droite (donc X8 est supérieur à un seuil) conduit à un sous-arbre ayant un taux de SiTP plus élevé.
3. Le risque de collision est aussi influencé par la vitesse relative entre les deux voies. Pour les trois scénarios considérés, si la vitesse sur la voie de droite est plus élevée, le risque de collision devient élevé. Si la vitesse sur la voie de gauche est beaucoup plus élevée que celle sur la voie droite, le risque est aussi augmenté.
4. La voie où les accidents ont eu lieu n'est pas enregistrée dans la base de données. Cependant, les résultats suggèrent que les collisions frontales-arrières sont causées par la fluctuation et l'interaction de trafic sur les deux voies par le biais de la vitesse.

5. Il est important à noter que la performance des modèles proposés n'est pas encore validée avec les nouvelles données. Toutes les données historiques ont été utilisées pour calibrer les modèles visant à trouver les variables importantes qui sont les causes principales des accidents dans le passé. Il est nécessaire que ces modèles soient validées avec les nouvelles données avant qu'ils peuvent être appliqués en réalité.
6. L'influence des conditions météorologiques est faible selon la faible importance de la variable X22 (précipitation). Ce résultat est inattendu au vu des forts impacts météorologiques sur la circulation et la sécurité routière enregistrés dans la littérature, par exemple, dans (Satterthwaite, 1976), (Edwards, 1999), (Keay and Simmonds, 2005), et (Andrey). Cependant, ce résultat est compréhensible sachant que :
    - La distance entre la station météorologique et le poste de comptage est relativement grande (environ 10km). La précipitation enregistrée à la station météorologique n'est probablement pas celle constatée au poste de comptage.
    - La précipitation seule n'est peut-être pas suffisante pour représenter l'impact météorologique sur la sécurité routière. D'autres variables potentielles incluent l'humidité de la chaussée et la visibilité au poste de comptage et nécessitent des stations météorologiques directement à proximité du lieu de l'accident.

Pour réduire les occurrences d'accidents, il est donc nécessaire de réguler la vitesse des véhicules sur chaque voie telle que les vitesses des véhicules à l'intérieur des voies soient proches. Cette régulation peut être basée sur la vitesse moyenne de tous les véhicules et sur la différence de vitesse entre les deux voies.

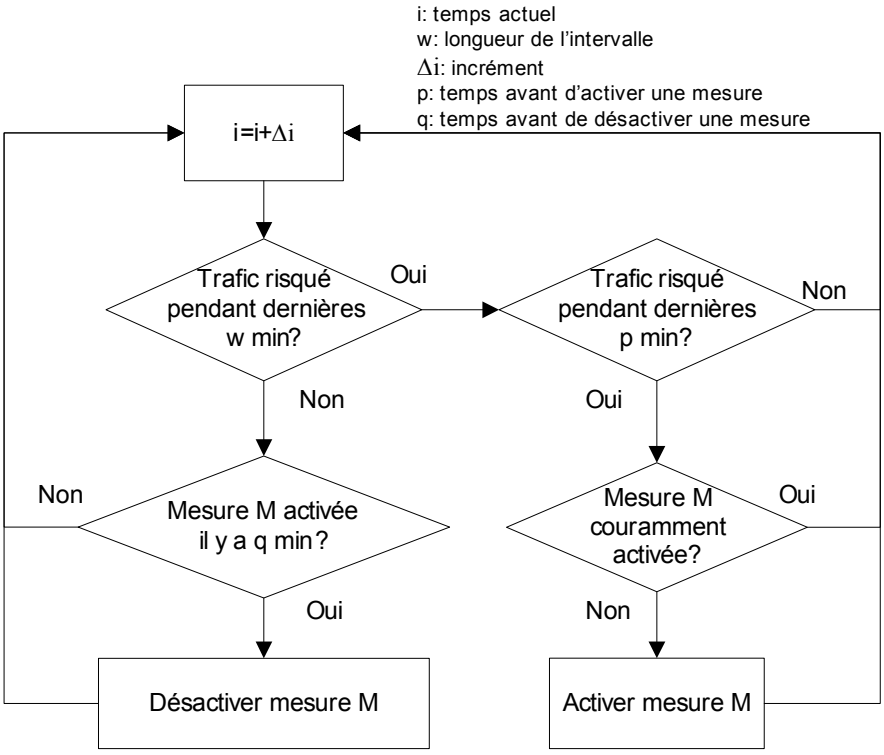


Figure 5 - Stratégie de gestion de trafic sensible aux risques

En temps réel, il est possible de réguler le trafic en suivant la stratégie de gestion de trafic sensible aux risques décrite en figure 5. En utilisant une fenêtre déplaçant d'un intervalle W de 5 minutes, i.e. la durée de SiT. Cette fenêtre déplaçant représente la situation de trafic la plus récente (les dernières cinq minutes en temps réel). Si i est le moment actuel, la fenêtre se

déplace avec des pas d'incrément de Δi secondes, i.e. la SiT la plus récente est recalculée toutes les Δi secondes. Pour chaque pas d'incrément, la SiT est transformée par l'ACP en vecteur d'entrée avant d'être classée dans un de huit scénarios. Si la SiT tombe dans un de trois scénarios A, D, ou G, elle serait vérifiée si elle est une SiTN ou une SiTP en appliquant les modèles développés dans la section 4. Dans le cas contraire, la SiT est jugée une SiTN. Si la SiT est une SiTN, les mesures préventives activées dans le pas précédant peuvent être désactivées. Si la SiT est une SiTP, les mesures préventives convenables peuvent être activées.

Une des mesures préventives est d'utiliser un système de panneaux à messages variables pour informer, guider ou contraindre les conducteurs. Parmi les messages à afficher, les limites de vitesse dynamiques peuvent être employées pour réguler le trafic et harmoniser la vitesse. Cependant, la distance entre des panneaux, le rythme de changement de limites de vitesse restent encore à étudier.

Dans la réalité, la réaction des conducteurs est aussi importante et celle-ci peut influencer l'efficacité de la gestion du trafic. Pour une gestion agressive, chaque fois qu'une SiT est identifiée comme SiTP, les mesures préventives sont activées. C'est peut-être une bonne solution pour enlever les risques mais c'est aussi un facteur diminuant la confiance des conducteurs si l'activation de mesures préventives est très fréquente. Pour cette raison, les valeurs des paramètres p et q en figure 5 restent à approfondir.

Pour un système complet de gestion de trafic sensible aux risques, les autres types d'accidents doivent aussi être étudiés. Pour la suite de notre étude, nous allons appliquer la même méthodologie pour trouver les variables déterminantes pour d'autres types d'accidents.

Références

- Andrey, J., "Long-term trends in weather-related crash risks.", Journal of Transport Geography, **18**(2): 247-258.
- Breiman, L., Friedman, J., et al. (1984). *Classification and Regression Trees*, Belmont C.A. Wadsworth.
- Edwards, J. B. (1999). "Speed adjustment of motorway commuter traffic to inclement weather.", Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour **2**(1): 1-14.
- Golob, T.F., Recker, W., et al. (2008). Probabilistic models of freeway safety performance using traffic flow data as predictors, Elsevier.
- Keay, K. and I. Simmonds (2005). "The association of rainfall and other weather variables with road traffic volume in Melbourne, Australia.", Accident Analysis & Prevention **37**(1): 109-124.
- Mathworks, T. (2010). "Classregtree class.", Matlab documentation-Statistics Toolbox, http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/stats/classregtreeclass.html, Jan 22.
- Oh, C., J.-S. Oh, et al. (2001). "Real-time Estimation of Freeway Accident Likelihood". 80th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C..
- Pande, A. and Abdel-Aty, M. (2005). "Identification of rear-end crash patterns on instrumented freeways: a data mining approach". Intelligent Transportation Systems, Proceedings IEEE.
- Satterthwaite, S. P. (1976). "An assessment of seasonal and weather effects on the frequency of road accidents in California.", Accident Analysis & Prevention **8**(2): 87-96.

UNE ETUDE CONCERNANT LES PELOTONS DE VEHICULES

Agrégé en Mathématiques (1999) et docteur en mécanique aléatoire (2005). Chercheur au LEPSIS depuis 2007 sur des activités concernent la modélisation des trajectoires de véhicules isolés et de pelotons de véhicules.

Dimitri DAUCHER
LEPSIS, UMR LCPC-INRETS
Paris, France

Résumé
Ce papier fait le point sur les débuts de travaux de recherche concernant les pelotons de véhicules. Nous commençons par rappeler les enjeux qui nous poussent à nous intéresser à cette notion. Nous définissons ensuite la notion de flot de véhicule. Puis nous abordons le problème de l'étude de cette notion (modèles, données issues d'observations en situation de conduite naturelle). Nous montrons quelques propriétés des pelotons à partir d'observations partielles disponibles. Enfin, nous proposons un cadre mathématique approprié à de futures études sur ce sujet ouvert.

Mots-clés: Sécurité routière, trajectoires de véhicules, conduite naturelle, pelotons de véhicules, processus stochastique.

Abstract
This paper reviews research works concerning platoon of vehicles. We call back why we are interested in this notion. We define then the notion of platoon (of vehicles). Then we tackle the problem of the study of this concept (model, experimental data, naturalistic driving).
We show some properties of platoon from available partial observations. Finally, we propose a mathematical frame suited to future studies on this opened subject.

Keywords: Road Safety, Vehicles trajectories, Naturalistic driving, Platoon, Stochastic process.

1. Introduction

En dépit d'une amélioration notable de la sécurité routière ces dernières années, le bilan des accidents de la route demeure très insatisfaisant en France en 2008 (4275 tués et 93798 blessés). Bien évidemment le bilan est encore plus lourd à l'échelle mondiale (environ 1,3 million de morts et 50 millions de blessés en 2008 d'après l'Organisation Mondiale de la Santé). Pour aller plus loin dans cet effort d'amélioration de la sécurité routière une piste de recherche est celle de la sécurisation des trajectoires des véhicules. Le LCPC porte plusieurs projets de recherche qui comportent une phase d'observation de trajectoires de véhicules dans leur contexte (« naturalistic driving »). Les objectifs sont toujours de :

- déterminer les facteurs qui influencent le plus la stabilité des trajectoires ;
- comprendre comment les sécuriser davantage.

Dans un premier temps il est apparu pertinent de s'intéresser aux trajectoires individuelles des véhicules isolés. Cette démarche est tout à fait judicieuse pour étudier par exemple les sorties de route en virage (voire en ligne droite). Par contre lorsque le trafic est plus dense, les questions de sécurité des trajectoires ne peuvent plus être abordées simplement du point de vue des trajectoires individuelles. Les interactions entre les véhicules deviennent prépondérantes. C'est pourquoi nous nous intéresserons ici aux trajectoires de pelotons de véhicules. D'après la définition donnée dans le glossaire de l'opération Métrologie du Trafic et des Trajectoires (MTT) par Daucher et al (2010), un peloton (de véhicules) est un ensemble de véhicules consécutifs dont les trajectoires sont significativement corrélées. Un peloton est donc constitué (Figure 1) à la fois :
- de véhicules libres c'est à dire de véhicules pouvant atteindre la vitesse qu'ils désirent. Cela signifie que l'on considère qu'ils ne sont pas gênés par les autres automobilistes. Ils ont un comportement identiques aux véhicules dits isolés c'est à dire seuls sur la route. Un véhicule en tête de peloton est un véhicule libre ;
- de véhicules contraints (c'est à dire non libres). Il s'agit de véhicules dont le comportement est perturbé par les autres véhicules environnants.

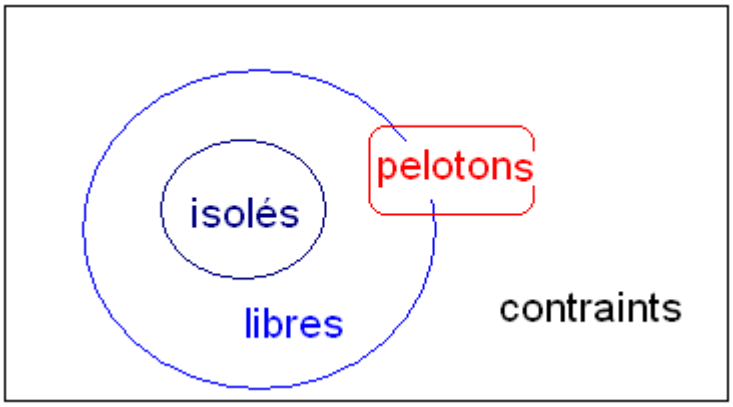


Figure 1 – Classification des catégories de véhicules en situation de conduite naturelle selon le glossaire MTT

Nous allons dans un premier temps présenter les résultats de travaux menés jusqu'à présent sur les pelotons au LCPC. Nous mettrons en évidence les difficultés liées à la mise en œuvre de ces approches. Elles sont principalement imputables à un manque d'observations précises de trajectoires de pelotons.

Nous proposerons ensuite un cadre mathématique approprié à une étude plus complète des pelotons (propriétés, simulations, …). Cette méthodologie est basée sur une exploitation de données métrologiques de meilleure qualité. Ceci n'est en aucun cas un facteur limitant car des données de ce type seront bientôt disponibles. En effet, le projet PREDIT MoCoPO qui vient d'être accepté fournira de telles données.

2. Pelotons de véhicules : une première étude

Nous nous intéressons ici aux trafics (sur une voie) présentant des risques d'accidents ou de sur-accidents accrus par rapport au trafic courant par combinaison de débit et vitesses élevés et d'interdistances courtes. Ce type de situation se rencontre fréquemment lors des pointes de trafic. Les congestions dans lesquelles les vitesses deviennent très basses sont exclues du champ de l'étude. On s'intéresse à des zones interurbaines où les vitesses pratiquées, même par fort trafic atteignent ou dépassent 60 à 100 km/h.

Nos objectifs sont alors de :

- définir la notion de flot de véhicules (Cette définition est plus générale que celle de peloton. Nous verrons plus loin que certains flots sont des pelotons. D'autres non. C'est par exemple le cas si les véhicules du flot ne sont pas suffisamment liés entre eux au sens de la définition donnée dans le glossaire MTT),
- d'en évaluer les propriétés,
- d'introduire une notion de risque (collision en file) tant pour des véhicules appartenant au peloton que pour des véhicules circulant au voisinage de celui-ci

2.1 Flot de véhicules

On définit un flot de véhicule par une fonction Ψ spatio-temporelle indexée sur $IN \times IR^+$ à valeurs dans IR^3 :

$$\begin{aligned} IN \times IR^+ &\rightarrow IR^3 \\ (n,t) &\mapsto \Psi(n,t) = (x_n(t), v_n(t), a_n(t)) \end{aligned} \qquad (1)$$

où :
n est le rang d'un véhicule dans le flot, $x_n(t)$ la position longitudinale (à partir d'une abscisse d'origine) du véhicule n à l'instant t, $v_n(t)$ et $a_n(t)$ sont respectivement la vitesse et l'accélération. Comme on peut le constater, il s'agit de la loi horaire des positions, vitesses et accélérations longitudinales d'une série de véhicules consécutifs dans une même voie.

2.2 Etude des flots de véhicules

Si l'on se fixe pour objectif d'étudier les propriétés des flots de véhicules de la forme (1) pour voir quels sont les flots de la forme « pelotons » deux approches peuvent être envisagées :

La première consiste à simuler des trajectoires en utilisant des modèles classiques. Il s'agit de modèles microscopiques du trafic (Cohen 1990). Malheureusement, les modèles de ce type n'ont pas été conçus pour ce genre d'étude. Comme leur nom l'indique, il s'agit de modèles de trafic, pas de modèles de trajectoires. Leurs principaux champs d'application sont plutôt l'évaluation de temps de parcours, la caractérisation de la congestion. Rien ne garantit que les trajectoires individuelles de véhicules qu'ils produisent sont suffisamment réalistes.

La seconde approche consiste à utiliser des observations précises de flot de véhicules. Malheureusement ce type d'observation n'existe pas à l'heure actuelle en Europe. Les

principales raisons sont le coût et la complexité des dispositifs à mettre en œuvre. Cependant, il existe des observatoires partiels de trajectoires de véhicule. C'est le cas par exemple de celui de la N118 (route périurbaine en banlieue Sud Est de Paris). Sur ce site on dispose de mesures par boucles magnétiques. Elles collectent pour chaque véhicule : son instant de passage, sa vitesse, sa longueur, et sa catégorie SETRA, le temps inter véhiculaire (TIV) qui le sépare du véhicule précédant. Ces mesures présentent beaucoup d'intérêt car :
- elles ne sont pas agrégées (accès à des informations véhicule par véhicule) ;
- le recueil a lieu sur 9 sites espacés les uns des autres d'environ 1 km ;
- les données sur des périodes longues sont disponibles (plusieurs mois).

Cependant les capteurs entre les différents sites sont rarement opérationnels en même temps. Il n'y a pas de synchronisation des horloges entre les différents sites.

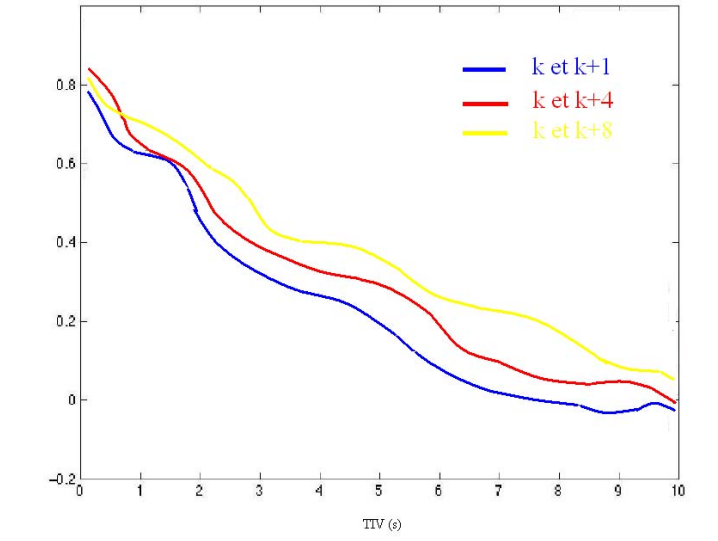


Figure 2 – Corrélation de vitesses entre véhicules consécutifs en fonction des TIV pour la file de gauche (rangs k et k+1, rangs k et k+4, rangs k et k+8)

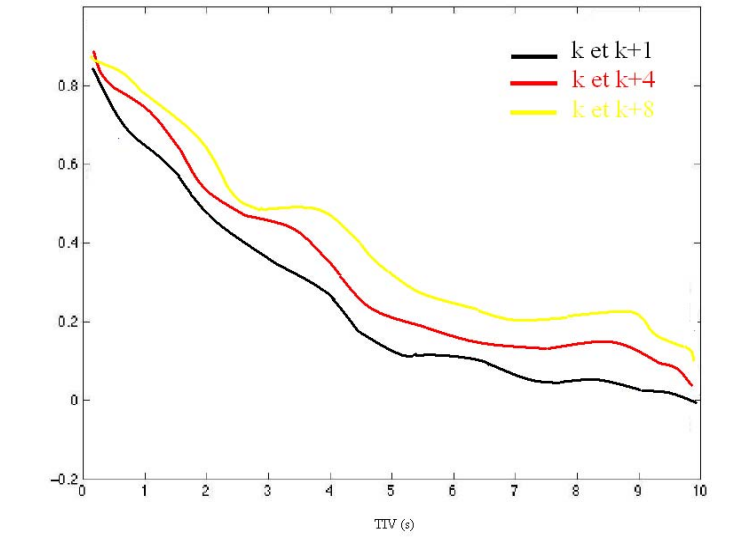


Figure 3 – Corrélation de vitesses entre véhicules consécutifs en fonction des TIV pour la file de droite (rangs k et k+1, rangs k et k+4, rangs k et k+8)

Nous avons d'abord extrait des données disponibles une plage où l'écoulement est relativement stationnaire (11h/16h). C'est à dire une plage où il y a suffisamment de trafic mais pas de congestions. Puis nous avons calculé les corrélations de vitesses entre véhicules consécutifs en fonction de classes de temps inter-véhiculaires : 0<tiv<3s ; 3s<tiv<6s… par voie de circulation (Figures 2 et 3).

On constate dans chacun des cas que ces corrélations décroissent de moins en moins vite avec l'augmentation du nombre de véhicules pris en compte. Plus il y a de véhicules, plus la liaison semble forte. Ceci tendrait à montrer que l'on a bien détecté ponctuellement un peloton.

2.3 Notion de risque

Les principaux risques de la conduite en file sont :

- la collision arrière : L'étude de Aron et al. (2007) sur des accidents autoroutiers montre par exemple qu'environ un tiers des accidents débutent par une collision arrière ;
- des interactions entre des files (toujours pour environ 1/3 d'après la même étude)

Plusieurs études ont été réalisées ces dernières années sur la réalisation de ces scénarios. On peut citer celle de Coiret et Delanne (2004) et celle de Appert-Rolland (2007). Cependant elles ne sont que partiellement validés du fait du manque de données recueillies.

3. Cadre mathématique pour une étude plus complète

Nous jetons ici les bases de futurs travaux qui seront réalisés dans le projet PREDIT MoCoPO. Nous faisons donc l'hypothèse que l'on dispose d'observations discrètes du processus aléatoire suivant :

$$\theta : \mathrm{IN} \times \mathrm{IR}^{+} \times \Omega \to \mathrm{IR}^{3} \qquad \text{Flot VL}$$

$$(n, t, \omega) \mapsto \theta(n, t, \omega) = \begin{pmatrix} x(n, t, \omega), v(n, t, \omega) \end{pmatrix} \tag{2}$$

Une telle modélisation permet de rendre compte de l'aléas des situations de trafic. Ce processus modélise le flot de véhicules. Nous envisageons d'étudier les stationnarités spatiales et temporelles d'une transformation $F(\theta)$ du processus θ. La détection de pelotons sera basée sur des changements de propriétés de $F(\theta)$.

Nous donnerons ensuite des définitions instantannées de pelotons (existence de corrélation entre 2 véhicules successifs, entre tout véhicule et le premier d'entre eux, entre tout couple de véhicule du peloton, …).
On pourra ensuite donner la définition d'un peloton pendant une durée T qui n'est autre que la traduction de la persistance dans le temps de la version instantannée :

4. Conclusion et perspectives

L'étude des pelotons de véhicules (et des risques associés à la conduite en peloton) demeure à ce jour un sujet difficile. La raison principale est le manque d'observatoire de trajectoire

précis de véhicules sur plusieurs centaines de mètres avec un faible pas de discrétisation. Ce manque de données n'a pas permis à ce jour de construire des modèles de simulations pertinents sur lesquels s'appuyer. Néanmoins un projet PREDIT qui verra le jour très prochainement permettra de recueillir des données allant dans le sens voulu. Nous pourrons alors mettre en œuvre certaines idées présentées dans le paragraphe 3.

Références

- Appert-Rolland, C. (2007), « Pelotons et sécurité routière », Rapport de recherche LCPC – Université de Paris XI, septembre.
- Aron, M., Seidowsky, R., et Cohen, S. (2007), « Indicateurs statistiques de risque , Application sur A4/A86 », Conférence ATEC.
- Aron, M. (1996), « Temps intervéhiculaires et vitesses», Recherche Transport Sécurité, n°64, pp 3-17
- Cohen, S. (1990), « Ingénierie du trafic routier », Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Coiret, A., et Delanne, Y. (2004), « Modélisation de risque d'occurrence d'accidents liés à l'hétérogénéité des véhicules au sein d'un peloton », JTR 2009.
- Daucher, D., Jacob, B., et Olivero, P. (2010), « Glossaire de l'opération Métrologie du Trafic et des Trajectoires », http://operationmtt.free.fr/.

Auteurs

ABADIE Vincent ……267
ANDRIEU Cindie ……391
ANELLI Pierre……207
ARON Maurice……237
AUBERLET Jean-Michel……177
AUBERT Didier……145
AUBIN Sébastien……177
BELIN Etienne……199
BERNARDIN Frédéric ……159, 217
BERTRAND Xavier……115, 247
BETAILLE David……257
BHASKAR Ashish……451
BIGORGNE Erwan……45
BLANCHARD Gilles……115
BOISSOU Jean-François……267
BORDEL Stéphanie……351, 379
BOSSU Jérémie……45
BOUCHER Vincent……199, 217
BOUTELDJA Mohamed……83
BREMOND Roland……25
BRIAND Patrice……177, 187
BRUNET Johann……145, 207
CEREZO Veronique……75, 83
CHARARA Ali……125
CHARBONNIER Pierre……35
CHASSANDE-MOTTIN Rodolphe……115
CHATEAU Thierry……441
CHRISTIANSON Kent……25
CLAIR David……159
COLOMB Michèle……217
CONCHE Florence……411
CREVITS Igor……311, 321
DA SILVA DIAS Pierre……145, 207
DAUCHER Dimitri……167, 465
DEREGNAUCOURT Justine……301
DESCHAUD Jean-Emmanuel……55
DESIRE Lara……379
DIK Radoine……247
DJEMAï Mohamed……93
DOUCET David……227, 237, 411

DOUMIATI Moustapha……..……...125
DROUOT Louis……..……301
DUMONT André-Gilles……..……...451
DUMONT Eric……..……...25, 199
DUMOULIN Jean……..……199, 217
DUPRE Guy……..……....135, 411
EYSSARTIER Chloé……..……..331
FOGLI Michel……..……..159, 167
GOULETTE François……..……55
GOYAT Yann……..……..441
GREENHOUSE Daniel……..……25
GREFFEUILLE Catherine……..……..351
GUYE Olivier……..……379
HAMELIN Fabrice……..……...331
HAUTIERE Nicolas……..……..45, 287
HERMITTE Thierry……..……357, 431
IENG Sio-Song……..……257
IMINE Hocine……..……93
JACOB Bernard……..……...187
KHEMOUDJ Omar……..……93
KOITA Abdourahmane……..……...167
LABAYRADE Raphaël……..……...421
LANDAIS Philippe……..……...187
LE BASTARD Cédric……..……..187
LECHNER Daniel……..……95, 125
LENARDI Massimiliano……..……..277
LEPERT Philippe……..……287
LOUAH Gérard……..……135
MAILLARD Julien……..……379
MAINCENT Annick……..……421
MARCHETTI Mario……..……217
MENANT Fabien……..……441
MENHOUR Lghani……..……95
MICHEL Gilles……..……341
MOKADDEM Abdel Kader……..……277
MORANGE Pierre ……217
NAUDE Claire……..95
NICOLLE Philippe……257
PACAUX-LEMOINE Marie-Pierre……..311, 321
PAGE Yves……367
PATTE Lionel……...65
PHAM Minh Hai……451
PHAN Vuthy……...431
PIERRE Philippe……341

PITARD Olivier……..441
PLAINCHAULT Patrick……177
POINDEXTRE Serge……369
QUEGUINER Ronan……351
REY Guillaume……..159
ROISSAC Zohra……421
SAINT PIERRE Guillaume……...401
SEGARRA Gérard……277
SENPAUROCA Joël……55
SLIM Hadi……...341
SUBIRATS Peggy……227, 237, 411
TAILLADE Frédéric……...199
TAREL Jean-Philippe……..35
TATTEGRAIN Hélène……..421
TERRADE Florence……..351
VACQUIER-BIGOT Cécile……...247
VICTORINO Alessandro……..125
VIOLETTE Eric……135, 227, 237, 411
YAHIAOUI Gérard……145, 207

Conférence sur la Sécurité Routière

Prévention des Risques et Aides à la Conduite
PRAC 2010

PRAC 2010 est une conférence scientifique visant à faire un état des progrès enregistrés ces dernières années dans le domaine de la sécurité routière. Elle s'attache notamment à faire le point sur les projets du PREDIT 3 et en particulier le projet SARI (Suivi Automatisé de l'état des Routes pour l'Information des gestionnaires et des conducteurs), et à définir des axes de développement futurs.

Copyright, LCPC 2010