

Partie 2

Conditions d'impact et vulnérabilité du piéton lors de l'impact véhicule et de la chute au sol

Fiche de synthèse

Contributeurs :

Chapitre 1 : Outils et méthodes pour l'usage de la simulation multicorps vers l'analyse globale du choc piéton UDS

Chapitre 2 : Variabilité des conditions de l'impact et vulnérabilité du piéton Ifsttar-LBA

Chapitre 3 : Variabilité des conditions de l'impact et vulnérabilité du piéton UDS et Ifsttar-LBA

Questions posées

L'analyse par simulation multicorps offre un champ d'investigation extrêmement large de l'accident piéton tant lors des phases d'impact contre le véhicule que pour l'analyse de la chute au sol.

Afin d'aller au-delà des approches usuelles dédiées à la reconstruction d'accidents réels, la simulation multi corps est employée ici pour évaluer la variabilité des conditions de l'impact piéton, pour en quantifier les incidences induites sur les conditions d'impact des différents segments corporels et enfin fournir une première évaluation de la sévérité potentielle des traumatismes que pourrait subir l'accidenté piéton.

Cette analyse de sensibilité pour être exhaustive doit prendre en compte les différentes grandes familles de véhicules identifiées à la partie 1 (dans l'analyse épidémiologique).

Elle permet enfin de déterminer la représentativité des essais d'évaluation qui sont aujourd'hui en vigueur.

Chapitre 1 : Outils et méthodes pour l'usage de la simulation multicorps vers l'analyse globale du choc piéton

La pertinence et la robustesse des outils de simulation multicorps exigent de disposer d'outils validés pour décrire l'ensemble des étapes du choc piéton depuis le premier impact jusqu'à la chute au sol. La position du piéton avant impact, les propriétés de la structure impactante, la localisation de l'impact (...) sont trop souvent mal connues rendant parfois difficile la reconstruction d'un accident ou la mise en œuvre d'études prospectives pertinentes. La méthode choisie ici est donc de simuler un ensemble de scénarii en utilisant une étude paramétrique automatisée. La préparation et le lancement de ces simulations se font de manière automatique par un programme qui va générer les différents scénarii en faisant varier les paramètres choisis. Le scénario le plus probable est alors obtenu par post traitement des simulations en comparant les données directement liées à l'accident telles que les localisations des différentes zones impactées et l'ordre dans lequel ces impacts se sont déroulés. Une application à un cas d'accident piéton vient illustrer les différentes étapes de la procédure proposée.

Résultats marquants :

Aspects méthodologiques : mise en œuvre d'un outil dédié pour analyser la diversité des conditions de l'impact piéton.

Chapitre 2 : Variabilité des conditions de l'impact et vulnérabilité du piéton

L'analyse de la variabilité des conditions d'impact et de la chute au sol trouve sa mise en œuvre dès la reconstruction d'accidents piétons dans sa totalité (du premier point d'impact jusqu'à la chute au sol). Ce type d'analyse présente un triple intérêt :

- Fournir les caractéristiques d'impacts de la tête contre le véhicule dans différentes configurations,
- Evaluer la chute au sol afin de différencier les conditions d'impacts contre le véhicule de ceux lors de la chute au sol.
- Comparer ces conditions d'impact aux différentes réglementations en vigueur.

Pour ce faire, il fallait tout d'abord mettre en place une méthodologie d'étude du choc de type véhicule/piéton qui soit validée. Il s'agit ici d'une approche globale où seuls les phénomènes majeurs (vitesse et décélération du véhicule, point d'impact du piéton sur le véhicule...) sont modélisés et simulés. La robustesse des modèles numériques et leurs domaines de validité peuvent alors être un élément bloquant. Pour éviter cet écueil, le couplage de l'approche numérique et expérimentale permet, sur la base d'essais dits de références, d'évaluer la validité des modèles existants et ainsi de définir précisément leur cadre d'utilisation.

S'agissant d'évaluer l'efficacité des systèmes de sécurité des véhicules, il est important de dissocier les conséquences lésionnelles de la chute au sol de celles induites par le choc contre le véhicule. Une des difficultés jusqu'ici rencontrées est associée à la pertinence de la simulation multi corps pour décrire la chute au sol. Dans cette optique, il a donc fallu renforcer la robustesse des modèles pour qu'ils décrivent de façon bio fidèle la cinématique complète du choc avec le sol.

La première phase de notre travail dans le cadre de ASP a donc été de valider notre modèle multicorps jusqu'à la chute au sol et de mettre en place une méthodologie générale d'étude paramétrique du choc piéton pour différentes configurations d'impact.

Résultats marquants :

Aspects méthodologiques : mise à jour et validation des modèles jusqu'à la chute au sol

Sur l'analyse de sensibilité : la vitesse du véhicule a une influence significative sur l'ensemble du phénomène mais également d'autres paramètres dont l'angle du piéton et la posture de marche.

Le corridor d'angle tête/pare-brise obtenu lors de nos différents plans d'expérience n'est pas cohérent avec le test standard Euro NCAP d'évaluation de la conformité des faces avant des véhicules.

Les conditions d'impact piéton-véhicule et piéton-sol sont comparables (accélérations, énergies, ...). Toutefois, s'agissant de l'impact tête, le choc piéton-véhicule apparaît en moyenne bien plus violent que la chute au sol.

Chapitre 3 : Conditions aux limites et variabilité de l'impact tête lors du choc piéton

Dans le but d'évaluer numériquement l'utilisation d'outils existants (modèles multi-corps et éléments finis) et notamment quantifier l'influence des conditions initiales de l'impact tête lors d'un impact piéton contre le capot ou le pare-brise, ou encore les conditions aux limites de la tête (corps entier ou tête seule), l'influence des positions du piéton avant impact, la morphométrie du sujet (adulte/enfant) ainsi que la vitesse des véhicules ou la raideur des composants impactants (pare-brise, capot), des études paramétriques ont été réalisées dans le cadre de ce projet. Dans ce qui suit on trouvera les résultats relatifs à l'influence des conditions aux limites de la tête lors de reconstruction de traumatismes crâniens de piétons, l'étude sur la comparaison de deux modèles piétons multi corps (Modèles CASR et TNO), ainsi que les résultats relatifs à l'influence de la posture, la face avant du véhicule, la vitesse d'impact sur la cinématique du piéton adulte et enfant.

L'analyse de sensibilité est ensuite étendue à l'analyse de l'influence de la posture (dans le cycle de marche), de la nature de la géométrie de la face avant du véhicule et conformément à ce qui a été identifié précédemment à la vitesse d'impact sur la réponse dynamique de la tête. Ce dernier plan d'expérience se focalisera en particulier sur le point d'impact de la tête, la mesure du WAD (Wrap Around Distance), la vitesse relative de la tête et l'angle d'impact.

Résultats marquants :

Chez l'adulte, le WAD tout comme la vitesse de la tête est influencée par la géométrie de la face avant du véhicule, la posture suivant le cycle de la marche ou encore la vitesse d'impact.

La vitesse d'impact de la tête est significativement plus faible que celle du véhicule (jusqu'à 25% plus faible chez les enfants).

La vitesse d'impact de la tête est également dépendante du type de véhicule. Elle est plus importante pour le SFC (small family car) et le LFC (large family car) que pour les SMC (Super Mini Car), MPV (Multi Purpose Vehicle) et SUV (Sport Utility Vehicle). Ces résultats plaident pour une modification des vitesses d'impact réglementaire avec une vitesse d'impact de la tête enfant plus faible que pour l'adulte.

L'angle d'impact de la tête dépend de la géométrie de la face avant du véhicule et de la posture dans le cycle de marche du piéton.

Pour la tête adulte, l'angle d'impact pour le SFC et le MPV est plus faible que pour les autres catégories de véhicules.

Les résultats obtenus suggèrent des modifications substantielles dans les procédures d'évaluation sur essais sous systèmes en proposant différents angles d'impact suivant différentes catégories de véhicules :

- *L'angle d'impact tête pour le SFC et MPV doit être inférieur au 65° proposés dans la réglementation pour la tête adulte.*
- *L'angle d'impact tête enfant pour le SMC et le LFC doit être supérieur aux 50° spécifiés par l'EEVC alors que pour les SUV, cet angle doit être inférieur aux 50° spécifiés par l'EEVC.*

SOMMAIRE

Chapitre 1	112
Outils et méthodes pour l'usage de la simulation multicorps vers l'analyse globale du choc piéton	112
1. Introduction	112
2. Développement d'un outil de reconstruction de la cinématique du piéton	112
2.1. Introduction.....	112
2.2. Module de prétraitement.....	113
2.3. Module de post traitement.....	115
2.4. Conclusion	116
3. Utilisation de l'outil de pré et post traitement pour l'analyse du second impact ...	117
3.1. Introduction.....	117
3.2. Synthèse des résultats obtenus.....	118
3.3. Conclusion	120
Chapitre 2	122
Variabilité des conditions de l'impact et vulnérabilité du piéton	122
1. Validation du modèle	122
1.1. Modélisation.....	122
1.2. Validation qualitative	124
1.3. Validation quantitative.....	125
2. Première analyse paramétrique (focalisée sur un modèle de véhicule).....	127
2.1. Les paramètres d'entrée	128
2.2. Les paramètres de sortie	130
2.3. Plan d'expérience	131
3. Deuxième analyse paramétrique étendue à 3 modèles de véhicules.....	137
3.1. Paramètres les plus influents	139
3.2. Comparaison des impacts tête/véhicule et tête/sol	140
3.3. Comparaison des 3 véhicules : C3, C4, C5	144
3.4. Comparaison des impacts bassin/véhicule et bassin/sol	146
4. Conclusion.....	149

Chapitre 3	150
Conditions aux limites et variabilité de l'impact tête lors du choc piéton	150
1. Influence des conditions aux limites de la tête lors de reconstruction de traumatismes crâniens de piétons	150
1.1. Introduction.....	150
1.2. Méthodologie	151
1.3. Résultats et conclusions sur l'influence des conditions aux limites de la tête lors de reconstruction de traumatismes crâniens de piétons.....	152
2. Etude sur la comparaison de deux modèles piétons multi corps (Modèles CASR et TNO)	152
2.1. Introduction.....	152
2.2. Description des modèles piétons	153
2.3. Synthèse et résultats de l'étude	153
3. Effects of pedestrian gait, vehicle front geometry and impact velocity on kinematics of adult and child pedestrian head	156
3.1. Introduction.....	156
3.2. Parametric study definition.....	156
3.3. Results	158
3.4. Conclusions.....	163

Chapitre 1

Outils et méthodes pour l'usage de la simulation multicorps vers l'analyse globale du choc piéton

1. Introduction

Dans cette tâche, une des difficultés jusqu'ici rencontrée est associée à la pertinence de la simulation multi corps pour décrire la chute au sol. En effet, plusieurs paramètres nécessaires à la simulation, tels que la position du piéton avant impact, les propriétés de la structure impactante, la localisation de l'impact etc., restent mal connus. Nous avons également vu en tâche 1.2 l'influence de tous ces paramètres sur la cinématique du piéton. La méthode développée ici en tâche 2.1 est donc de simuler un ensemble de scénarii en utilisant une étude paramétrique automatisée. La préparation et le lancement de ces simulations se font de manière automatique par un programme qui va générer les différents scénarii en faisant varier les paramètres choisis (posture, vitesse du véhicule, type de véhicule, masse et taille du piéton...). Le scénario le plus probable est alors obtenu par post traitement des simulations en comparant les données directement liées à l'accident telles que les localisations des différentes zones impactées et l'ordre dans lequel ces impacts se sont déroulés, comparer les distances de projection simulées et observées sur le terrain... Nous présenterons dans ce qui suit l'outil automatique de pré et post traitement de simulations cinématiques développé dans cette tâche ainsi que son utilisation dans des cas de reconstructions d'accidents réels.

2. Développement d'un outil de reconstruction de la cinématique du piéton

2.1. Introduction

Les outils de modélisation multi corps, tels que Madymo®, sont d'une grande aide pour évaluer la cinématique du piéton en situation d'accident. A partir de modèle biofidèle du corps humain, ils permettent de rendre compte des conditions initiales de la tête avant impact qui seront utilisées comme données d'entrée à une simulation par éléments finis du traumatisme crânien. Il est néanmoins nécessaire, pour obtenir une simulation valide, de connaître le maximum de paramètres liés aux conditions initiales de l'accident ainsi que ceux extraits post accident. Un grand nombre de ces paramètres reste souvent mal contrôlé. La méthode consiste donc à faire varier ces paramètres ou facteur jusqu'à obtenir le scénario de l'accident le plus probable. La manière la plus simple pour faire varier les paramètres est de suivre un plan d'expérience. Ce plan d'expérience, en plus de déterminer le niveau optimal des paramètres pour le scénario le plus probable, est également un outil capable de déterminer les paramètres les plus influents et les plus robustes. Le choix des paramètres à faire varier et leurs niveaux fixent les limites de l'analyse paramétrique et déterminent le « domaine expérimental ». Dans cette étude, le plan d'expérience choisi se base sur les tables orthogonales. Les tables orthogonales permettent de n'utiliser qu'une fraction de l'ensemble des combinaisons du plan factoriel complet. Les combinaisons sont choisies afin de fournir une information suffisante pour déterminer l'effet des facteurs à l'aide de l'analyse des

moyennes. Les tables orthogonales sont équilibrées, c'est à dire que dans les combinaisons retenues, tous les niveaux ont le même poids. En fait, l'orthogonalité implique que l'effet de chaque facteur peut être évalué mathématiquement indépendamment des effets des autres facteurs. Ainsi quand une table complète donne 128 combinaisons pour une analyse paramétrique de 7 facteurs à 2 niveaux, la table orthogonale n'en sélectionnera que 8. Le plan orthogonal présente donc la manière la plus efficace pour mener un plan d'expériences ou une analyse paramétrique. Nous verrons dans ce qui suit les outils de pré et post traitement développés ainsi que leur utilisation dans la reconstruction d'accidents piétons réels.

2.2. Module de prétraitement

Le module de pré traitement peut se diviser en deux parties :

- Une partie qui consiste à adapter le modèle humain en situation initiale d'accident.
- Une deuxième partie permettant la sélection et la modification des paramètres étudiés.

Ces deux parties peuvent se réunir dans un même organigramme, comme illustrée en **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

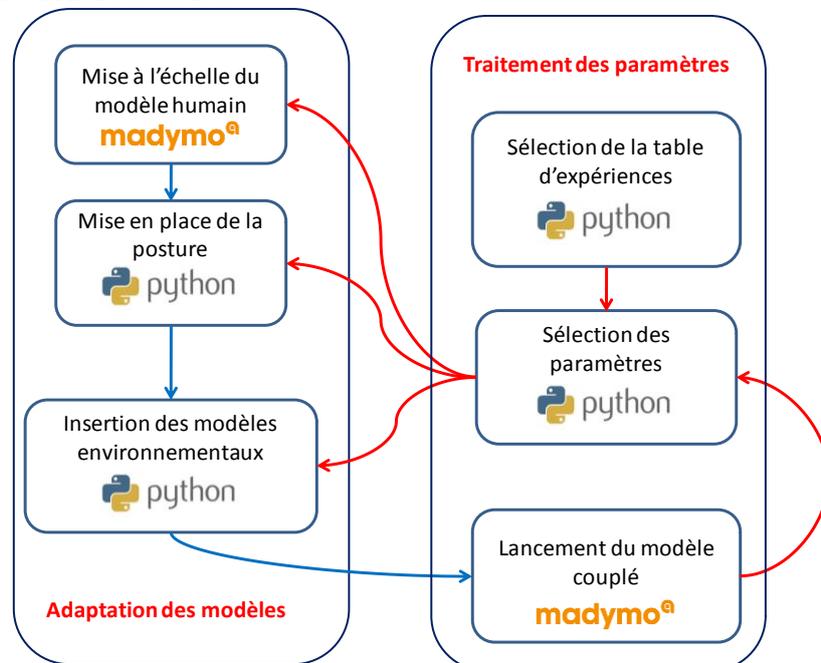


Figure 1 : Organigramme de fonctionnement du module de pré traitement.

Le module de mise à l'échelle est un module de Madymo® utilisant les données GEBOD (GÉnerator of BOdy Data) en indiquant le genre, la taille et la masse du modèle humain à simuler. En revanche le module de mise en place de la posture a été développé sous le langage Python. Il permet d'orienter les membres supérieurs et inférieurs correspondant à la posture de marche choisie. Pour cela une base de données d'orientations des différents joints pour chaque posture (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) a été implémentée.

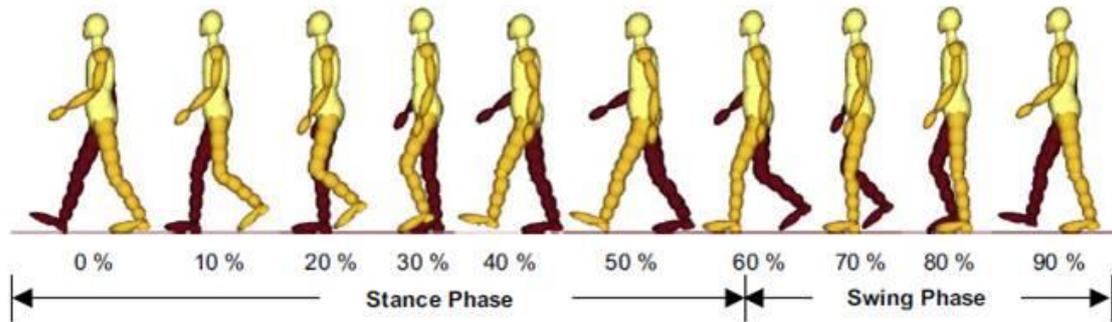


Figure 2 :Présentation des différentes postures du piéton.

L'insertion des modèles environnementaux (voiture) se fait également par une routine en langage Python.

L'interface qui permet de générer le modèle couplé est représentée en **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Nous pouvons sélectionner le genre, la taille et la masse du modèle humain ainsi que sa posture. Le bouton « *Include File* » nous permet d'insérer le modèle environnemental (une voiture par exemple) et de modifier les propriétés des surfaces de contact, puis les conditions initiales avant choc. Nous avons toujours la possibilité de visualiser le modèle sous XMagic®. Puis une fois le modèle vérifié, le bouton « *Add to List* » met en queue la simulation à exécuter.

En ce qui concerne la deuxième partie du module de pré traitement, il va nous permettre de sélectionner une table d'expérience et de choisir les paramètres à faire varier afin d'étudier leur influence sur le comportement de la cinématique du piéton (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). L'ensemble des combinaisons est résumé dans la fenêtre des listes des tâches et est prêt à être exécuté.

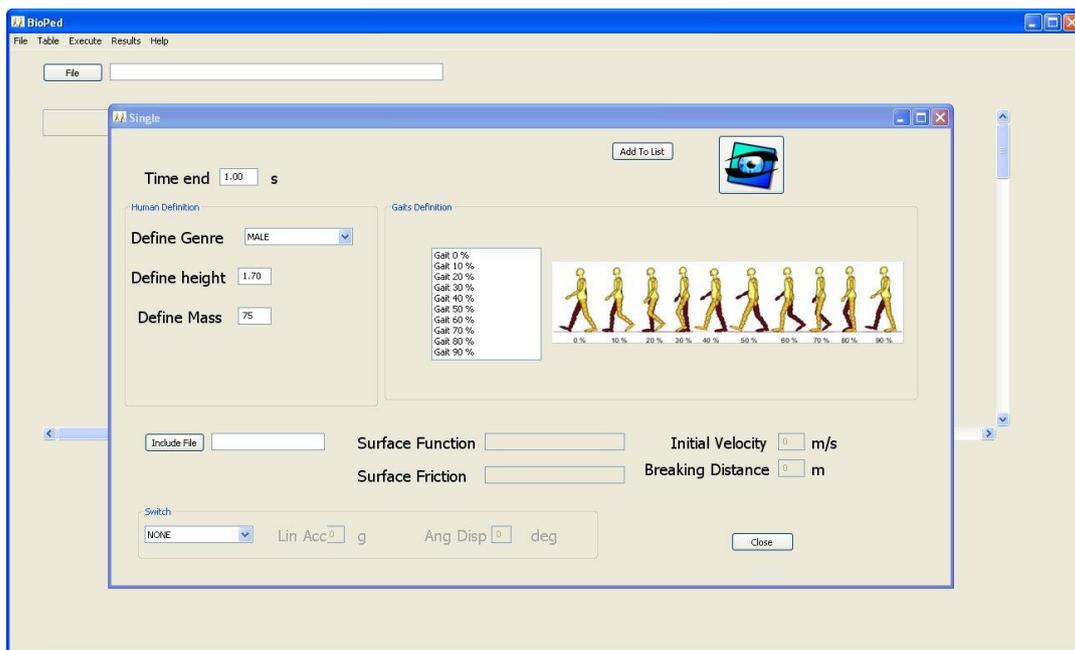


Figure 3. Représentation de l'interface permettant la génération du modèle couplé.

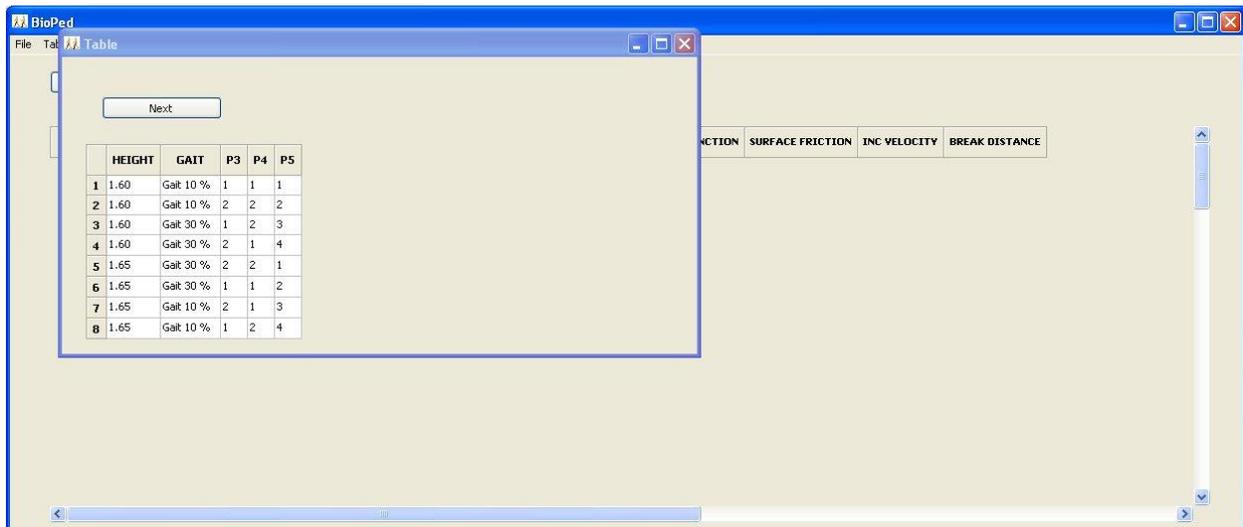


Figure 4. Représentation d'une table d'expérience sélectionnée et des facteurs à étudier.

2.3. Module de post traitement

Le module de post traitement développé ici, consiste à analyser les différentes simulations définies par la liste des tâches. Ce module peut se diviser en deux procédés :

- Une analyse d'une seule simulation à la fois,
- Une analyse d'un ensemble de simulations définies par la table d'expérience.

Pour étudier une simulation particulière, on charge le fichier texte qui résume toutes les informations concernant le chemin de la simulation et le nom des fichiers Madymo® dans l'interface de résultat (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Le bouton « Calcul » permet d'extraire la ou les surfaces qui ont été en contact avec la tête. Une fois la surface sélectionnée, le module calcule la localisation du point de contact sur la tête et extrait la vitesse avant impact. Tous les contacts sont également résumés en ordre d'apparition. Le bouton « Visual » permet de visualiser le vecteur vitesse sur la tête, comme illustrée en **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**. Le module calcule également la distance entre une partie du corps, sélectionnée préalablement (par exemple la tête), et un point virtuel dont on connaît parfaitement les coordonnées (par exemple une zone du pare-brise).

En ce qui concerne l'analyse d'un ensemble de simulations établies selon une table d'expérience, le fichier texte contenant les informations sur le chemin des simulations, contient également le nom de chaque simulation effectuée et la table d'expérience associée. On peut visualiser, pour chaque variable réponse, les effets des paramètres étudiés ainsi que leur robustesse.

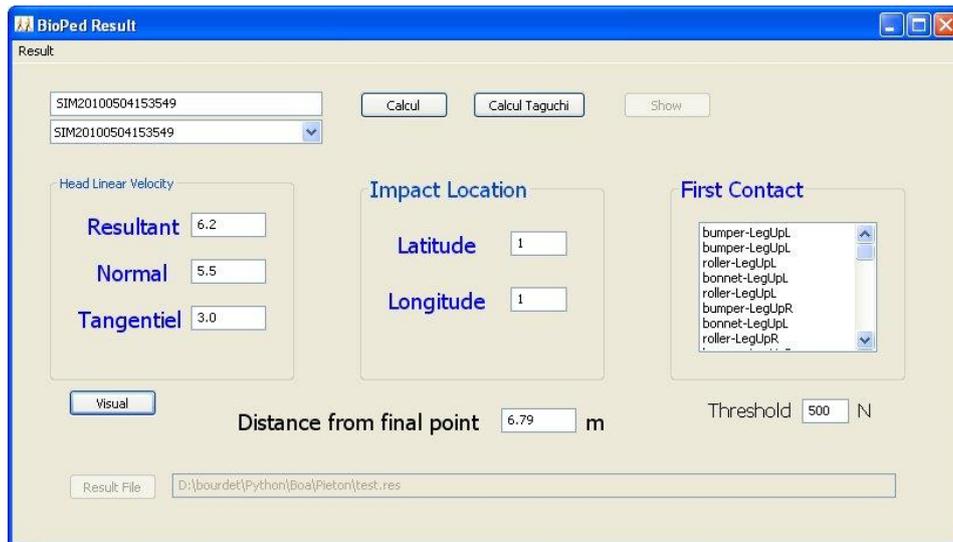


Figure 5. Représentation de l'interface de calcul pour une simulation seule.

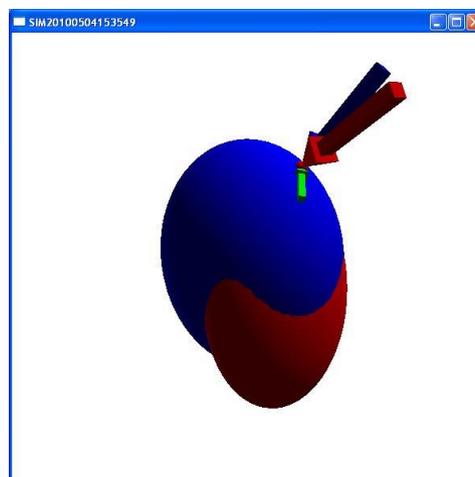


Figure 6. Représentation du vecteur vitesse sur la tête (en rouge : la résultante, vert : la composante tangentielle, et en bleu : la composante normale).

2.4. Conclusion

Outre l'approche originale dans l'analyse de la cinématique du piéton dans le cadre de reconstructions d'accidents réels, ces programmes, développés dans le cadre de ce projet, constituent un outil puissant d'analyse paramétrique des conditions initiales de la tête lors du premier impact mais également lors de la chute au sol. Cet outil a été utilisé lors d'une étude paramétrique de grande ampleur dont les principaux résultats sont exposés dans ce qui suit.

3. Utilisation de l'outil de pré et post traitement pour l'analyse du second impact

3.1. Introduction

L'outil développé dans la tâche 2.1 et présenté plus haut a été utilisé lors de l'analyse de l'impact au sol de la tête lors d'accidents de piétons avec un véhicule. Pour cela plusieurs paramètres ont été étudiés : des paramètres liés directement au piéton tels que la posture, la vitesse de marche, l'orientation par rapport à la voiture, et des paramètres liés au véhicule tels que la vitesse du véhicule, l'angle de freinage.

Ainsi plusieurs paramètres ont été sélectionnés comme indiqués dans le tableau et sur la Figure . Les réponses étudiées sont la surface contact véhicule, la vitesse d'impact tête et la localisation de l'impact sur la tête. Quatre géométries de véhicule ont été sélectionnées avec 3 vitesses d'impact sous 2 angles de freinage, 10 postures et 7 orientations du piéton avec 2 vitesses de marche ont permis de simuler 3360 accidents de piétons.

Tableau 1 - Sélection des paramètres ainsi que les différents niveaux de valeurs.

Facteurs liés au piéton			Facteurs liés à la voiture	
Postures	Orientation	Vitesse de marche	Forme	Vitesse
10 Postures 0% to 90%	$-\pi/2$ (Rear impact)	0 m/s	LFC	20 km/h (5.5 m/s)
	$-\pi/3$		MPV	
	$-\pi/6$		SFC	
	0 (Lateral impact)	5 km/h (1.4 m/s)	SFC	
	$\pi/6$		SMC	40 km/h (11.1 m/s)
	$\pi/3$			
	$\pi/2$ Frontal impact)			

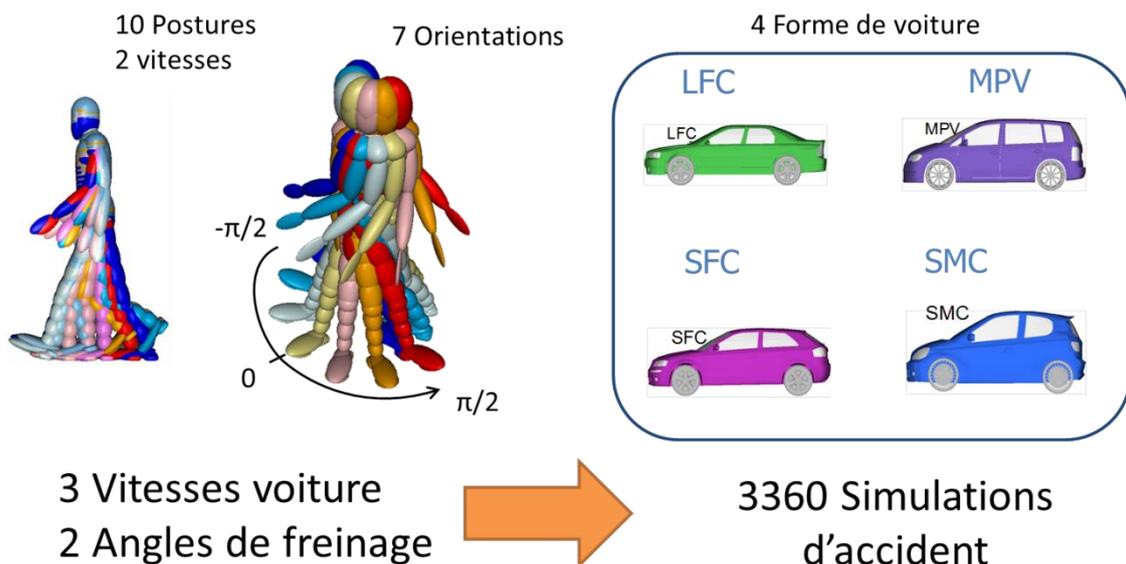


Figure 7. Représentation des paramètres et les valeurs à faire varier.

Les réponses ont été étudiées au premier et au second impact de la tête à savoir capot et pare-brise pour le premier impact et sol pour le second. Le modèle humain est un modèle homme 50th percentile avec une masse de 75 kg et une taille de 1m75.

3.2. Synthèse des résultats obtenus

Les résultats de l'ensemble de ces simulations sont présentés dans les Figure , Figure 9, Figure , Figure 11. Ces résultats synthétiques sont données en termes de vitesses de la tête juste avant impact ainsi que de l'angle de celle-ci par rapport à la surface impactée et ceux pour le premier impact et l'impact au sol, pour différentes vitesses et type de véhicule.

Pour chaque géométrie de véhicule on observe une zone privilégiée du point d'impact tête sur le véhicule. En revanche, pour les zones d'impacts tête, les zones de la tête les plus touchées lors du premier impact sur pare-brise ou capot sont les zones frontale et occipitale. Dans le cas des chutes au sol, les zones les plus souvent impactées de la tête sont les zones occipitales et fronto-vertex.

Les résultats sont également présentées par type de véhicule en termes de distance de projection et ceux pour les différentes vitesses étudiées.

Ces résultats sont une synthèse des résultats obtenus dans le cadre de ce projet concernant l'étude paramétrique automatisée de l'accident de piéton.

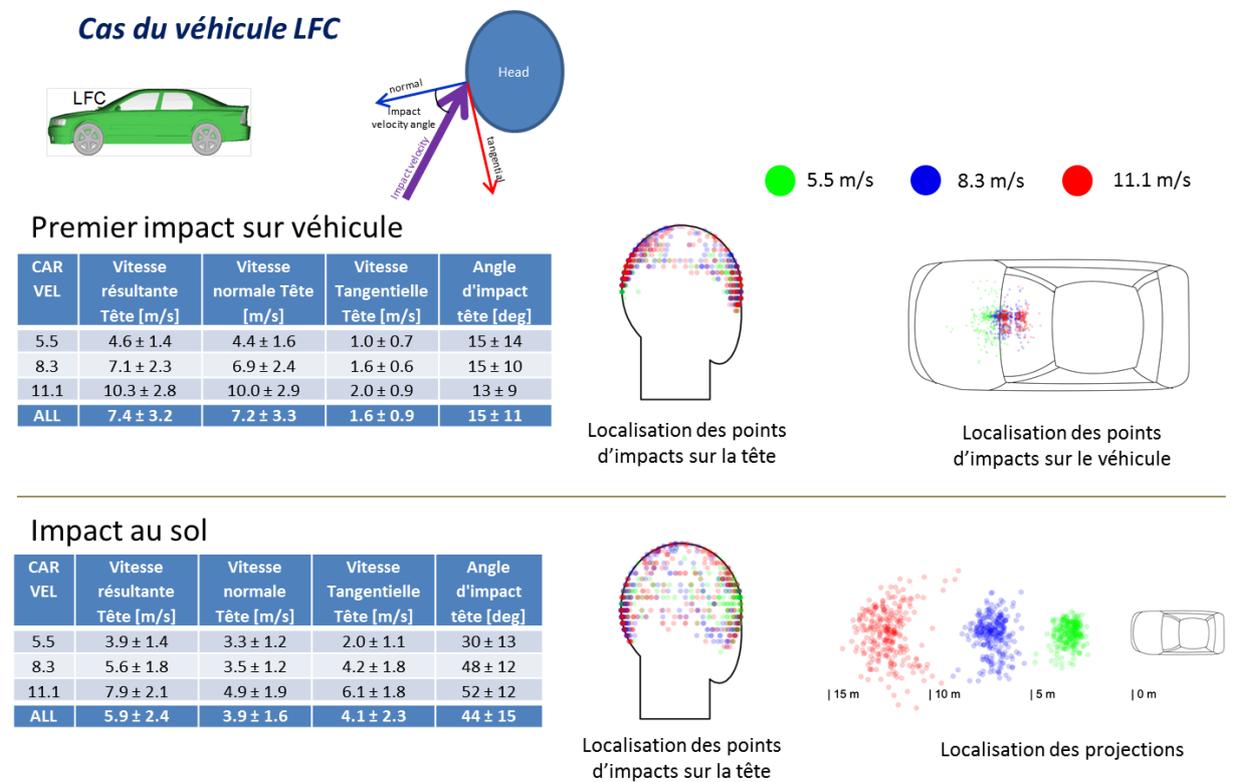
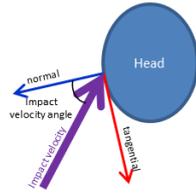


Figure 8. Synthèse des simulations d'accident pour la géométrie LFC.

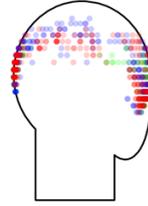
Cas du véhicule MPV



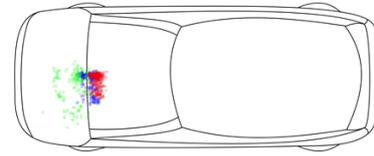
Premier impact sur véhicule

CAR VEL	Vitesse résultante Tête [m/s]	Vitesse normale Tête [m/s]	Vitesse Tangentielle Tête [m/s]	Angle d'impact tête [deg]
5.5	4.2 ± 1.3	4.0 ± 1.4	1.1 ± 0.6	18 ± 13
8.3	6.9 ± 2.0	6.7 ± 2.0	1.6 ± 0.9	14 ± 9
11.1	10.5 ± 2.0	10.3 ± 2.1	2.0 ± 1.0	11 ± 6
ALL	7.4 ± 3.1	7.2 ± 3.2	1.6 ± 0.9	14 ± 10

5.5 m/s 8.3 m/s 11.1 m/s



Localisation des points d'impacts sur la tête



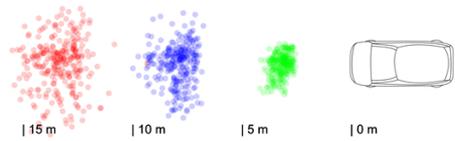
Localisation des points d'impacts sur le véhicule

Impact au sol

CAR VEL	Vitesse résultante Tête [m/s]	Vitesse normale Tête [m/s]	Vitesse Tangentielle Tête [m/s]	Angle d'impact tête [deg]
5.5	4.5 ± 1.5	3.7 ± 1.2	2.5 ± 1.2	33 ± 11
8.3	8.2 ± 1.5	4.2 ± 1.0	6.9 ± 1.6	58 ± 9
11.1	9.0 ± 2.3	5.0 ± 1.7	7.1 ± 2.8	53 ± 15
ALL	7.3 ± 2.6	4.3 ± 1.4	5.5 ± 2.9	48 ± 16



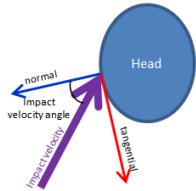
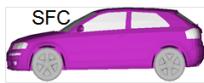
Localisation des points d'impacts sur la tête



Localisation des projections

Figure 9. Synthèse des simulations d'accident pour la géométrie MPV.

Cas du véhicule SFC



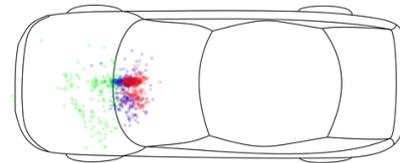
Premier impact sur véhicule

CAR VEL	Vitesse résultante Tête [m/s]	Vitesse normale Tête [m/s]	Vitesse Tangentielle Tête [m/s]	Angle d'impact tête [deg]
5.5	4.2 ± 1.4	4.0 ± 1.6	1.1 ± 0.6	19 ± 14
8.3	7.0 ± 2.2	6.8 ± 2.3	1.4 ± 0.8	14 ± 10
11.1	10.6 ± 2.5	10.1 ± 2.6	2.8 ± 1.4	17 ± 10
ALL	7.5 ± 3.3	7.1 ± 3.3	1.8 ± 1.3	16 ± 12

5.5 m/s 8.3 m/s 11.1 m/s



Localisation des points d'impacts sur la tête



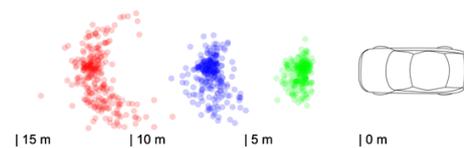
Localisation des points d'impacts sur le véhicule

Impact au sol

CAR VEL	Vitesse résultante Tête [m/s]	Vitesse normale Tête [m/s]	Vitesse Tangentielle Tête [m/s]	Angle d'impact tête [deg]
5.5	3.1 ± 1.2	2.7 ± 0.9	1.5 ± 1.0	27 ± 12
8.3	4.7 ± 1.8	2.9 ± 1.1	3.6 ± 1.7	50 ± 11
11.1	7.2 ± 1.6	4.1 ± 1.6	5.8 ± 1.4	55 ± 11
ALL	5.1 ± 2.3	3.2 ± 1.4	3.7 ± 2.3	45 ± 17



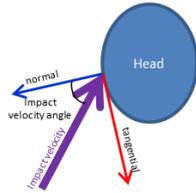
Localisation des points d'impacts sur la tête



Localisation des projections

Figure 10. Synthèse des simulations d'accident pour la géométrie SFC.

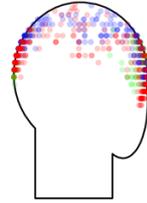
Cas du véhicule SMC



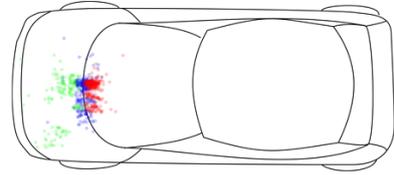
Premier impact sur véhicule

CAR VEL	Vitesse résultante Tête [m/s]	Vitesse normale Tête [m/s]	Vitesse Tangentielle Tête [m/s]	Angle d'impact tête [deg]
5.5	4.3 ± 1.2	4.0 ± 1.3	1.4 ± 0.6	21 ± 14
8.3	6.9 ± 2.2	6.7 ± 2.5	1.2 ± 0.7	14 ± 14
11.1	10.4 ± 2.7	10.2 ± 2.9	1.5 ± 0.8	10 ± 10
ALL	7.6 ± 3.3	7.4 ± 3.5	1.3 ± 0.8	14 ± 13

● 5.5 m/s ● 8.3 m/s ● 11.1 m/s



Localisation des points d'impacts sur la tête



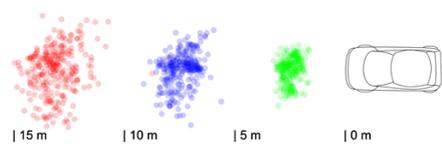
Localisation des points d'impacts sur le véhicule

Impact au sol

CAR VEL	Vitesse résultante Tête [m/s]	Vitesse normale Tête [m/s]	Vitesse Tangentielle Tête [m/s]	Angle d'impact tête [deg]
5.5	3.8 ± 1.3	3.2 ± 1.2	1.8 ± 0.9	29 ± 12
8.3	7.2 ± 2.1	3.8 ± 1.0	6.1 ± 2.0	57 ± 7
11.1	9.6 ± 1.8	4.4 ± 1.6	8.3 ± 2.1	61 ± 12
ALL	7.0 ± 3.0	3.8 ± 1.4	5.5 ± 3.2	50 ± 18



Localisation des points d'impacts sur la tête



Localisation des projections

Figure 11. Synthèse des simulations d'accident pour la géométrie SMC.

3.3. Conclusion

L'objectif de cette tâche a été de développer une méthode automatique de reconstruction de la cinématique du piéton à partir de données d'accidents réels, permettant à terme d'obtenir rapidement les conditions initiales réalistes de la tête pour simuler le traumatisme crânien en éléments finis.

Une présentation de cette méthodologie basée sur le développement d'un outil a été réalisée en décrivant les deux modules de pré et post traitement. Le module de pré traitement a permis de mettre en place une table d'expérience autour de différents paramètres ou facteurs de reconstruction de la cinématique définis à partir des données réelles de l'accident. Le choix du plan d'expérience s'est porté sur un plan fractionnaire orthogonal de Taguchi. Cette méthode permet d'étudier l'effet de chaque facteur indépendamment des autres facteurs en un minimum de combinaisons possibles. Cependant, le modèle de Taguchi retenu ici ne prend pas en compte les interactions des différents facteurs. Il est toutefois possible de définir des tables d'expérience complètes avec un temps important de simulations et de traitement des données. Ce module de prétraitement a également permis de mettre en place les différents modèles utilisés tels que le modèle de véhicule ou le modèle humain multicorps TNO redimensionnable.

Le second module de l'outil développé à savoir le post-traitement, a permis d'analyser les différentes simulations définies par le plan d'expérience. En fonction des résultats obtenus sur les effets des paramètres d'entrée sur les paramètres de sortie, il devient possible de définir la simulation la plus probable donnant les résultats les plus proches des données de l'accident réel.

Cet outil a été appliqué sur la base d'une reconstruction de 3360 accidents virtuels de piéton. On obtient ainsi une bonne représentation des impacts sur véhicule, illustrée en Figure , ainsi que sur le sol, illustrée en Figure .

Premier impact sur véhicule

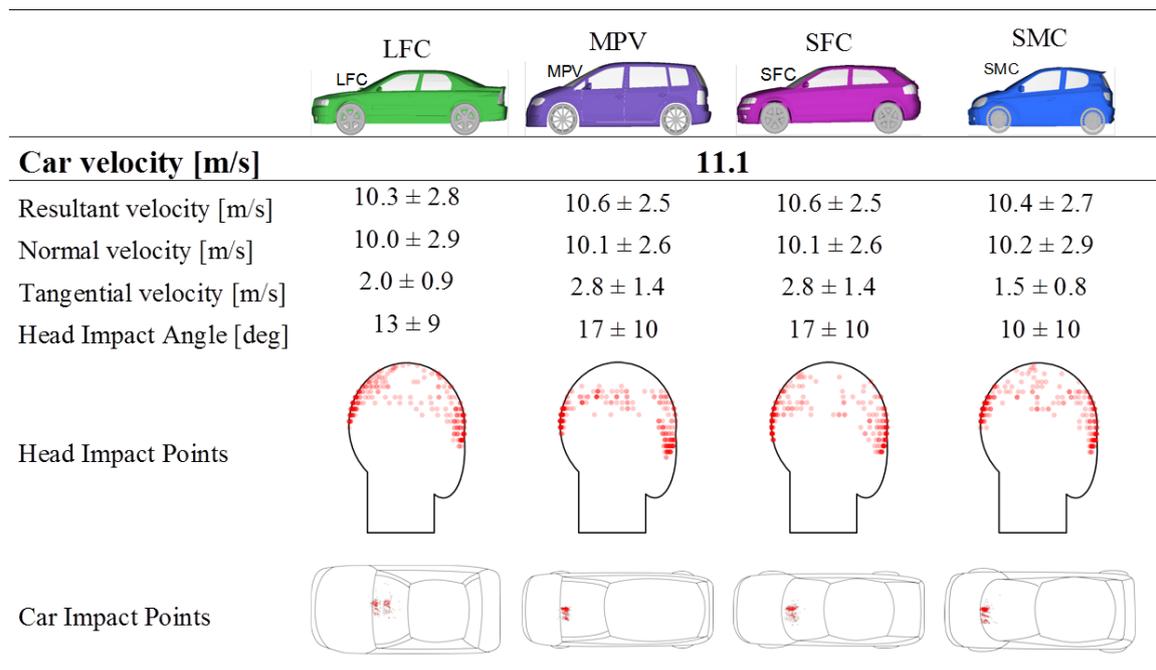


Figure 12. Synthèses des reconstructions des accidents piétons réels et virtuels pour le premier impact.

Impact au sol

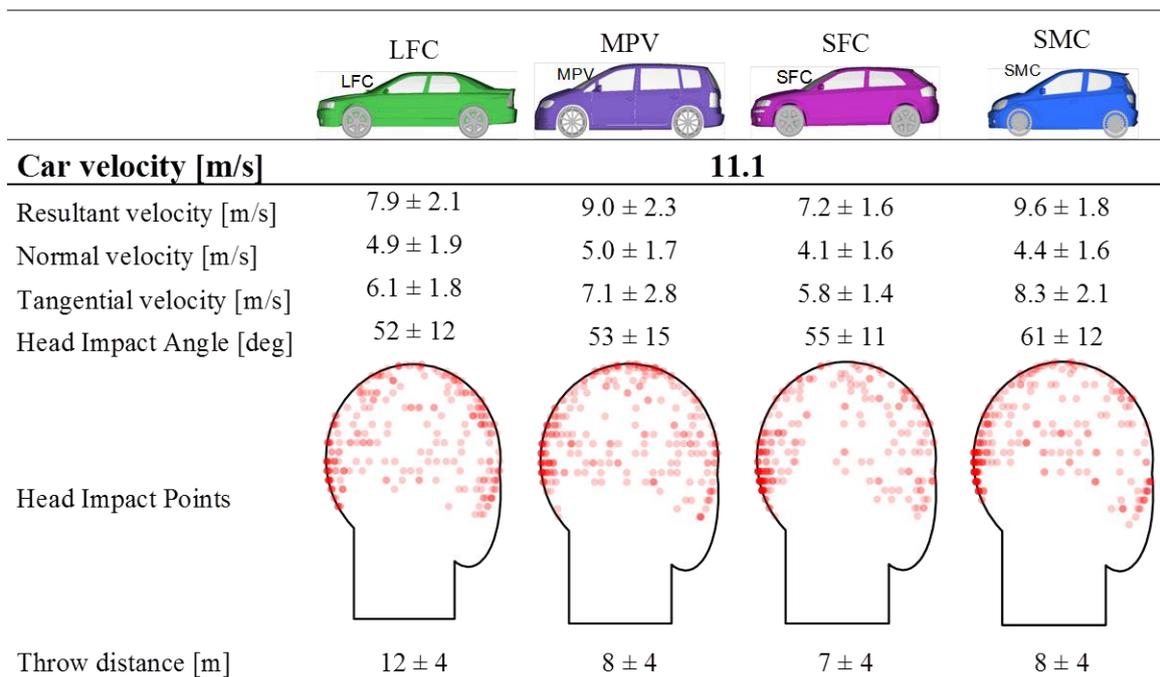


Figure 13. Synthèses des reconstructions des accidents piétons réels et virtuels pour l'impact au sol.

Chapitre 2

Variabilité des conditions de l'impact et vulnérabilité du piéton

1. Validation du modèle

1.1. Modélisation

Le modèle multicorps de piéton utilisé par le Laboratoire de Biomécanique Appliquée est, à l'origine, un modèle mis au point en 1994, dans le cadre d'un programme de recherche en collaboration entre l'Université de Chalmers (Suède), l'équipementier automobile ECIA (devenu Faurecia) et le Laboratoire de Biomécanique Appliquée. Ce modèle a initialement été conçu afin d'étudier l'influence de la forme du pare-choc sur les blessures du piéton au niveau des membres inférieurs et sur le comportement cinématique global. Le modèle complet regroupant le véhicule et le piéton a donc été conjointement développé et validé qualitativement et quantitativement par ces 3 partenaires pour la phase de choc contre le véhicule mais pas pour la chute au sol. Il permet notamment de connaître l'évolution cinématique du piéton ainsi que les accélérations des différents segments corporels (figure 14).

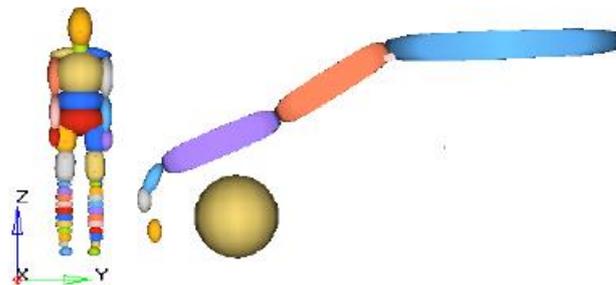


Figure 14 – Modélisation multicorps d'un choc piéton

Dans un premier temps notre travail s'est axé sur la validation du modèle et plus précisément sur la validité de la simulation numérique de la chute au sol du piéton après collision avec le véhicule. Il s'agissait ici de s'assurer que le comportement du piéton numérique était similaire à celui d'un piéton réel lors d'un accident, chose qui n'a jamais encore été réalisée au sein du laboratoire. Il est en effet très utile de connaître le mécanisme de la chute au sol, afin de pouvoir juger des lésions que cette dernière peut causer au piéton. Le but est de pouvoir différencier avec précision les blessures liées à l'impact véhicule et celles liées à l'impact sol.

La validation du modèle s'est donc basée sur la comparaison de la cinématique et des accélérations subies par le piéton lors de la simulation numérique avec les résultats observés et enregistrés lors d'un essai expérimental pleine échelle. L'étude s'est appuyée sur un crash test réalisé au LBA avec un sujet anatomique et une Citroën C3 dans une configuration de choc centré à 39 Km/h. Nous avons disposé pour effectuer cette validation du compte rendu détaillé de l'essai, de différents fichiers vidéos, de photos, du compte rendu de dissection, et des résultats des différents accéléromètres.

Géométrie du véhicule

Pour être le plus fidèle à l'essai, il a été nécessaire d'adapter les propriétés géométriques du véhicule pour se rapprocher au mieux de la forme d'une Citroën C3 (figure 15). Ceci a été réalisé grâce à l'utilisation d'un modèle éléments finis de C3. La carrosserie de la voiture a alors été exportée vers Madymo, et les ellipsoïdes de notre modèle multicorps ont été superposées au modèle très précis réalisé en éléments finis.

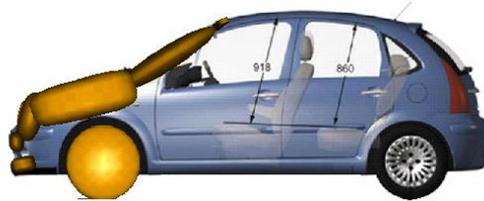


Figure 15 – Comparaison entre les géométries du véhicule et le modèle numérique

Propriétés mécaniques

Une modélisation fidèle d'un accident nécessite une bonne connaissance des propriétés de contact entre le véhicule et le corps humain. En effet, pour modéliser un crash sous Madymo, il faut définir des contacts entre nos différents systèmes. Or, pour définir ces contacts, il faut connaître les caractéristiques de nos éléments, c'est-à-dire les raideurs, les amortissements, les lois de comportements force/pénétrations. Pour cela, des essais sous-systèmes expérimentaux existent et permettent de connaître les contacts impliquant une partie précise du véhicule.

En l'absence de ces données sur le véhicule de travail Citroën C3, Nous avons utilisé le modèle numérique du véhicule C3 fourni dans le projet APPA par le constructeur. Ce modèle a été validé sur le logiciel de crash Radioss.,

Les essais expérimentaux permettant la caractérisation des contacts ont été reproduit numériquement. Nous avons impacté les 4 grandes zones de collision caractéristique du choc piéton avec à chaque fois un corps rigide de la forme du segment anatomique du piéton.



Figure 16 – Impact des corps rigides pour la caractérisation des lois de déformations

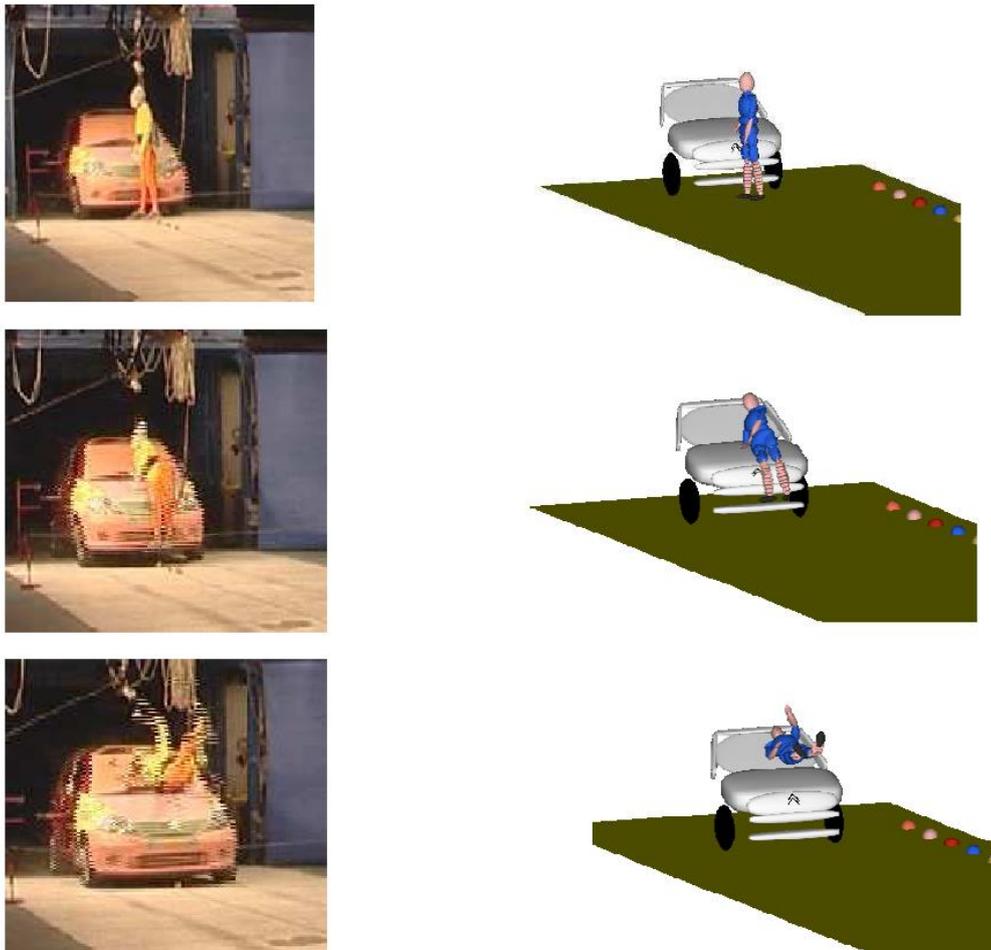
Par exemple, nous avons impacté la calandre du véhicule avec un cylindre afin de respecter au mieux la géométrie de la jambe. Le cylindre a été placé perpendiculairement à la surface d'impact, et projeté à une vitesse de 39km/h correspondant à celui de l'essai. Le logiciel permet d'extraire différentes courbes caractéristiques, et notamment la force de contact en fonction de l'enfoncement (pénétration). Ceci a été réalisé de la même manière avec un impact pare-choc/cylindre, sphère/capot, et pour finir sphère/pare-brise. Ces lois de comportements ont ensuite été implémentées dans notre modèle de véhicule sous Madymo.

Modèle de piéton

Le système multicorps correspondant au corps humain est à l'origine composé de 35 corps rigides, 35 liaisons et 82 surfaces de contact (ellipsoïdes). Les caractéristiques mécaniques des liaisons et des corps sont basées sur des données biomécaniques disponibles dans la littérature. La morphologie du piéton a été adaptée à celle du sujet anatomique utilisé pour l'essai, soit 1m75 et 67kg. La posture du piéton avant le choc a aussi été adaptée afin de se retrouver au maximum dans les conditions de l'essai expérimental.

1.2. Validation qualitative

Au vue de la cinématique générale du piéton durant le choc, et après une observation précise du comportement de chaque segment corporel, nous avons pu procéder à une validation qualitative de notre modèle. Les positions des 2 impacts principaux (impact tête/pare-brise et chute au sol) sont très proches des postures observées sur les vidéos d'essais. La figure 17 suivante fournit une comparaison des deux cinématiques du premier point d'impact jusqu'à la chute au sol. On retrouve notamment une position de chute au sol similaire dans les deux cas (flan droit du piéton), un comportement au sol par simulation cohérent (glissement sur le ventre), et une position finale très proche dans les deux cas.



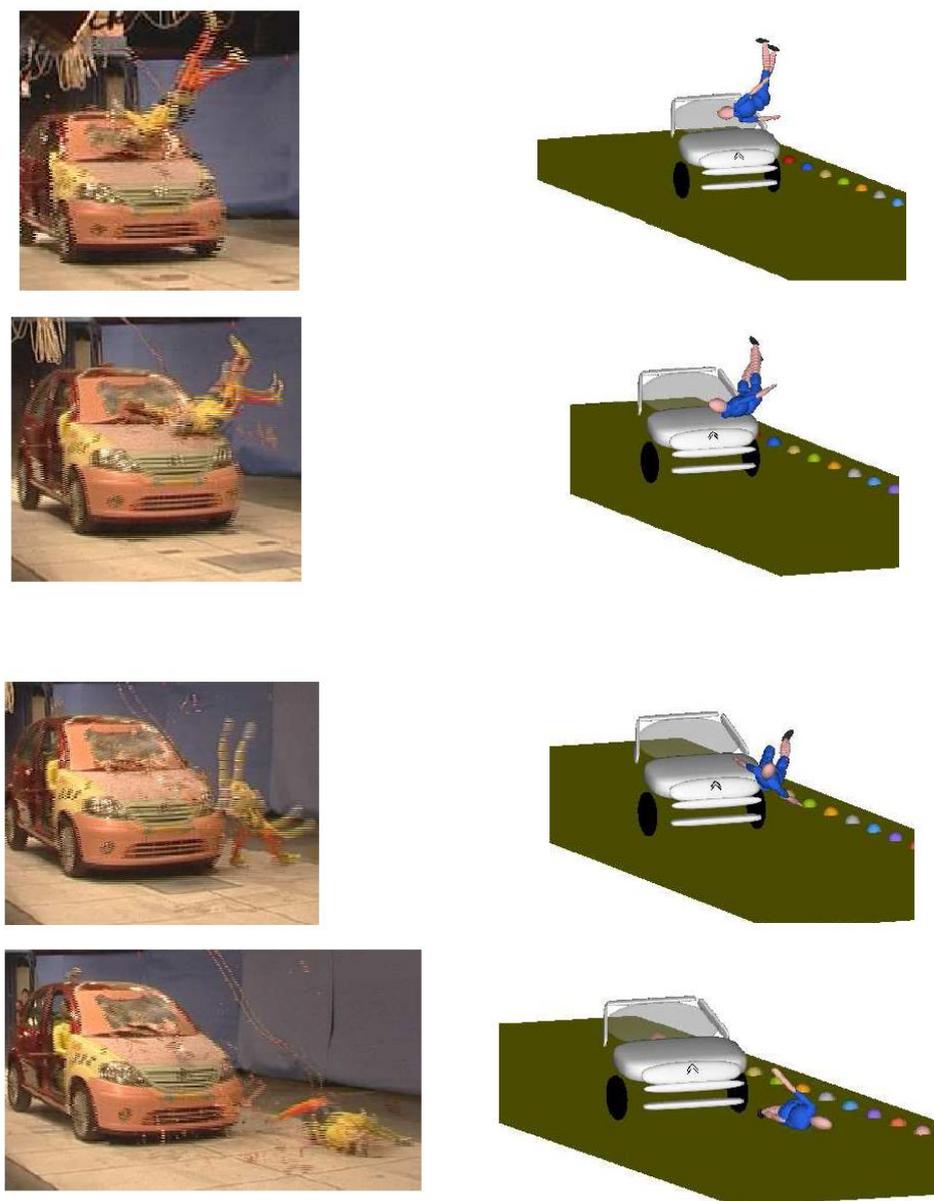
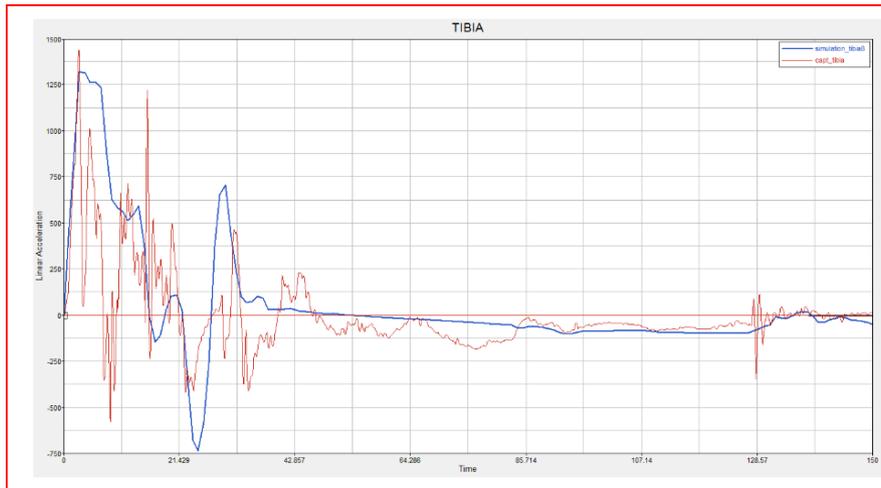


Figure 17 : Validation qualitative

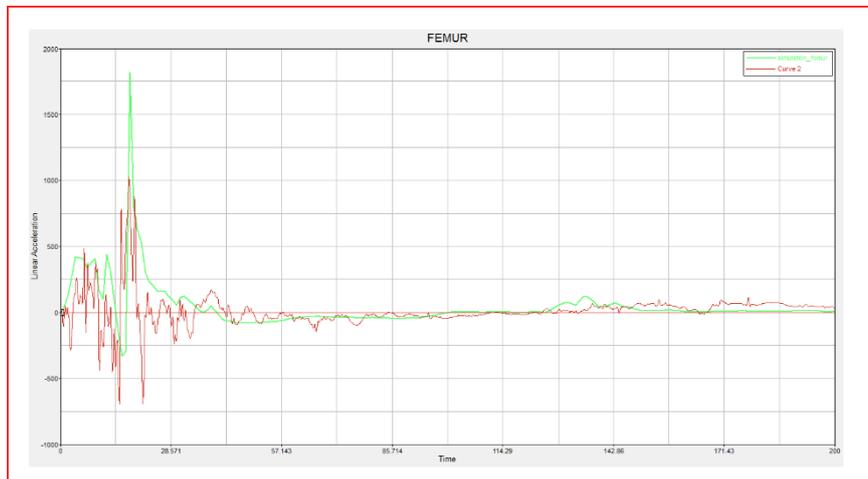
1.3. Validation quantitative

En plus de la cinématique globale, nous avons procédé à une validation quantitative des résultats issus des accéléromètres placés sur le sujet. Le nombre de capteurs sur le piéton étant limité, tous les segments ne sont pas équipés de capteurs tri axiaux. Malheureusement, le membre pelvien a seulement été équipé de capteurs mono axiaux sur le tibia et le fémur. Etant fixé sur le corps, ils retranscrivent des accélérations suivant un axe propre au piéton, car celui-ci est en mouvement par rapport au repère global. La comparaison et la corrélation sont donc très difficiles à faire avec les données issues de la simulation Madymo, eux-mêmes exprimés dans le repère global.

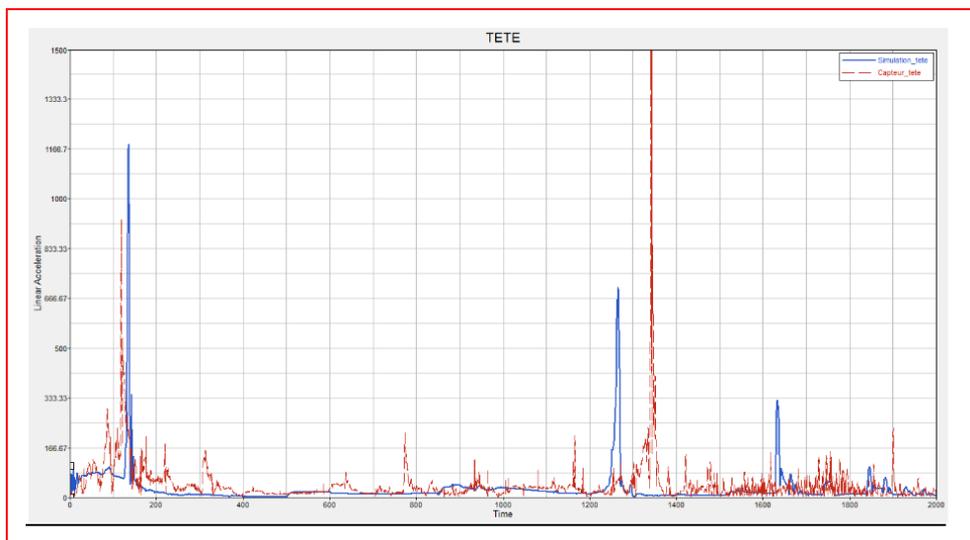
Nous nous sommes donc concentrés principalement sur une corrélation en temps des pics d'accélération et sur l'ordre de grandeur des amplitudes. Les figures 18, 19 et 20 montrent la superposition des courbes respectivement pour les segments corporels du tibia, du fémur et de la tête.



En rouge : Essai expérimental, En bleu : Simulation numérique
Figure 18 : Accélération de la partie supérieure du tibia.



En rouge : Essai expérimental, En vert : Simulation numérique
Figure 19 : Accélération du fémur.



En rouge : Essai expérimental, En bleu : Simulation numérique
Figure 20 : Accélération de la partie supérieure du tibia.

Au niveau de la tête, nous disposons d'un capteur tri axial. Il est donc intéressant de regarder la résultante des différentes voies, malgré la défaillance de la voie X durant l'essai.

Au niveau du premier pic d'accélération (120 ms) correspondant au choc tête/pare-brise, la simulation présente un retard de 13 ms, soit une erreur de 10.8 %. Ce retard provient de l'inclinaison de la tête au moment de l'impact. Dans la simulation, la tête n'est pas inclinée, contrairement à l'essai où celle-ci est en flexion latérale, et donc vient heurter le pare-brise plus tôt. Au niveau de l'amplitude, nous ne pouvons établir une comparaison minutieuse au vu de la défaillance d'une voie, mais nous observons des accélérations du même ordre de grandeur, c'est-à-dire autour de 100g.

Une fois la modélisation d'impact piéton/véhicule satisfaisante, nous nous sommes attardés sur la partie chute au sol en essayant d'obtenir la même cinématique du piéton après contact sur le pare-brise. Cette phase est particulièrement délicate, l'effondrement du pare-brise étant très difficilement simulable.

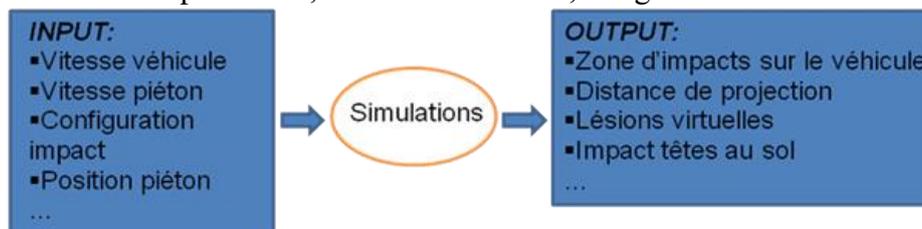
Nous avons donc éprouvé beaucoup de difficultés à retrouver cette cinématique du piéton avant la chute au sol. Après une observation plus fine des vidéos du crash test, nous avons soupçonné l'action du câble reliant la connectique des capteurs du piéton au système d'acquisition. En effet, à environ 700ms celui-ci semble se tendre et donc provoquer une rotation du piéton.

Pour reproduire cette action extérieure dans notre simulation, nous avons soumis notre piéton à une force de rotation à l'instant correspondant à la tension du câble. Cet élément a permis l'obtention d'une simulation très satisfaisante sur un point de vue cinématique. On retrouve le glissement du piéton sur le capot et une chute au sol sur le flan droit du piéton.

Le rôle du câble est donc confirmé ; en simulant son action on arrive à retrouver une cinématique très proche de celle du crash test. Au niveau du second pic d'accélération (1400 ms) correspondant au choc tête/sol, la simulation présente une avance de 100 ms par rapport au résultat de l'essai, soit une erreur de 7%. On peut donc valider la simulation obtenue dans son intégralité, et donc valider la phase de chute au sol.

2. Première analyse paramétrique (focalisée sur un modèle de véhicule)

Après avoir validé notre modèle de chute au sol, nous avons procédé à une étude paramétrique. Le but de cette étude exploratoire dans un premier temps, est de déterminer les paramètres (vitesse véhicule, position piéton...) les plus influents lors d'un choc piéton/véhicule. Cette influence est jaugée au travers de réponses comme la position de l'impact de la tête sur le pare-brise, la vitesse de la tête, l'angle tête à l'instant du choc...



Nous utilisons pour cette étude le modèle validé durant l'étape précédente, avec un piéton représentatif du 50^{ème} percentile, c'est-à-dire 1m78 et 76kg.

2.1. Les paramètres d'entrée

Pour réaliser cette étude paramétrique, il a d'abord fallu sélectionner les paramètres à étudier. Le tableau 2 ci-dessous fournit l'ensemble des facteurs étudiés retenu pour l'étude paramétrique ainsi que leur plage de valeurs respectives. Par la suite, nous allons détailler plus précisément ces facteurs.

Tableau 2 – Ensemble des facteurs retenus et leur domaine expérimental respectif

Facteur	plage de valeurs respectives
Vitesse véhicule	min 18 km/h max 50km/h
Décélération	min -8m/s^2 max 0m/s^2
Vitesse piéton	min 0 m/s max 2,8m/s
Latéralisation du point d'impact	min -0,4 m max 0,4m
Angle piéton	min -90° max 90°
Position marche	0% 30% 50%

a) Vitesse du véhicule

On étudiera l'influence de la vitesse du véhicule au moment de l'impact. Les vitesses d'impact lors d'un choc véhicule/piéton se situent en général entre 20 km/h et 50 km/h. Dans le cadre de notre étude, nous retiendrons une vitesse minimale de 5 m/s (soit environ 18 km/h) et une vitesse maximale de 15m/s (soit environ 50 km/h), ainsi que les valeurs intermédiaires de 7 m/s, 9 m/s, 11 m/s, 13 m/s, et 14 m/s. Ce paramètre étant très influent, nous décidons de l'étudier plus finement.

b) Décélération

C'est le comportement du conducteur du véhicule qui influe sur ce paramètre et en conséquence sur l'assiette de freinage du véhicule.

Trois cas sont simulés :

- Aucun freinage, le conducteur ne réagit pas, soit car il ne voit pas le piéton suffisamment tôt, soit par manque de réflexe ou panique
- Freinage moyen de -4 m/s^2 , pouvant correspondre à un freinage dans des mauvaises conditions (chaussée glissante ou système de freinage défaillant)
- Freinage maximum de -8m/s^2 , correspond au freinage maximal d'un véhicule de tourisme équipé de l'assistance au freinage (ABS)

c) Vitesse piéton

Lors d'accident, le piéton est souvent en mouvement, en phase de traversée de la chaussée. Il est donc intéressant d'étudier l'influence de la vitesse du piéton au moment de l'impact. Trois situations sont simulées :

- Piéton à l'arrêt
- Piéton en train de marcher, soit une vitesse de 1m/s (3,6km.h)
- Piéton en train de courir, soit une vitesse de 2,8m/s (10km/h)

d) Latéralisation du point d'impact

Pour diverses raisons, le point d'impact du piéton sur le véhicule peut fortement varier. Le contact peut en effet s'effectuer tout le long de la face avant du véhicule. Les deux

cas extrêmes de bordures du véhicule ont été modélisés ainsi que le cas du choc centré (figure 21).

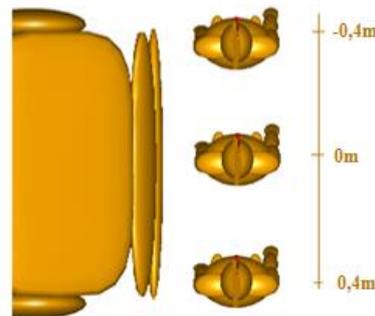


Figure 21 – Différents points d'impact sur la face avant du véhicule (vue de dessus)

e) Angle piéton

Tout comme la latéralisation du point d'impact, l'angle piéton au moment de l'impact peut fortement varier. Nous avons donc choisi d'étudier l'influence de l'angle formé par le plan sagittal du piéton et par le plan vertical passant par le pare-choc de la voiture (un angle nul correspond alors à un impact latéral du piéton)(figure 22).

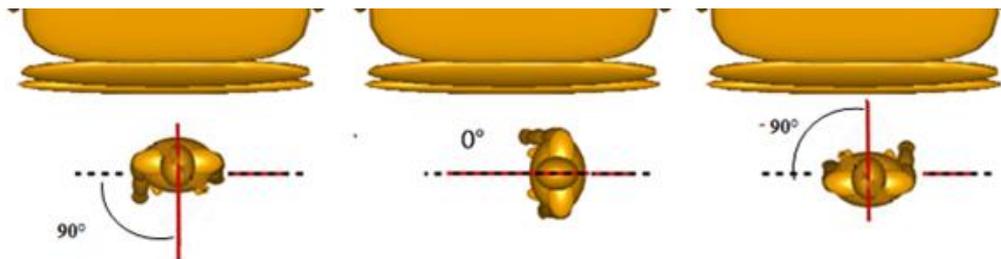


Figure 22 – Différents angles du piéton (vue de dessus)

f) Position marche

Au cours de la marche, l'homme prend différentes postures qui font varier l'angle de ses épaules, de ses coudes, de ses hanches et de ses genoux. Dix grandes phases sont répertoriées, et sont exprimés en pourcentage du paramètre de marche¹. Nous avons ici modélisé 3 phases caractéristiques (figure 23):

- Les 2 pieds touchent le sol, la jambe droite est positionnée devant.
- Seul le pied droit est en contact avec le sol, la jambe est en balancier vers l'avant.
- Les 2 pieds touchent de nouveau le sol, la jambe gauche est positionnée devant.

¹ Costin D.Untaroiu, Mark U.Meissner, jeff R.Crandall. Crash reconstruction of pedestrian accidents using optimization techniques. International Journal of Impact Engineering 36 (2009)210-219

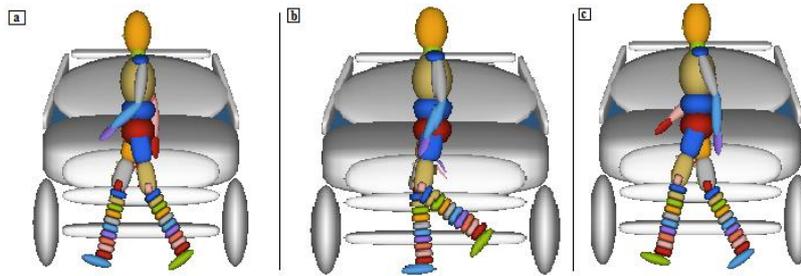


Figure 23 – Différentes positions durant la marche (vue de face)

2.2. Les paramètres de sortie

Nous souhaitons principalement connaître l'influence des facteurs précédemment cités, sur les paramètres caractéristiques de la violence d'un choc piéton/véhicule (distance de projection du piéton, position de l'impact de la tête sur le pare-brise, différentes vitesses de la tête au moment de l'impact). Ces paramètres vont aussi être intéressants pour la validation de la pertinence d'essais sous-systèmes (type Euro NCAP). Le tableau 3 résume les différents paramètres étudiés en sortie. Par la suite, nous allons décrire plus précisément l'ensemble de ces paramètres.

Tableau 3 – Paramètres étudiés en sortie de l'étude paramétrique

Facteur	Détails
Distance de projection longitudinale	axe y
Distance de projection latérale	axe x
Vitesse linéaire de la tête	axes x,y et z
Accélération linéaire de la tête	axes x,y et z
Angle tête au moment de son impact	axe x
WAD	plan (y,z)

a) Distances de projection longitudinale et latérale

Pour calculer les distances de projection longitudinale et latérale, on considère la position du bassin à la fin de la simulation. On obtient ainsi la distance entre la position initiale du piéton (avant le choc) et sa position finale (après le choc).

b) Vitesse linéaire de la tête

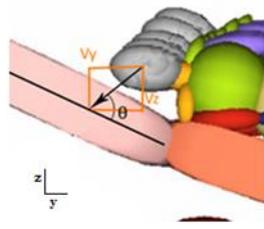
Les 3 vitesses linéaires suivant les 3 axes ainsi que la résultante sont calculées au moment où la pénétration de la tête avec le véhicule ou avec le sol devient non nulle.

c) Accélération linéaire de la tête

La résultante de l'accélération linéaire de la tête est calculée au moment où elle atteint son maximum.

d) Angle de la tête avec l'horizontale au moment de l'impact

L'angle α (en degrés) est calculé en fonction de la vitesse relative du centre de gravité de la tête par rapport au véhicule, au moment où la pénétration de la tête avec le véhicule devient non nulle (figure 24):



$$\alpha_{tete} = \arctan\left(\frac{\dot{z}_T}{\dot{y}_T}\right) \frac{180}{\pi}$$

Figure 24 – Vecteurs vitesse et formule de calcul de l'angle

e) WAD

Pour calculer la position de l'impact de la tête sur le pare-brise, on relève la position du centre de gravité de la tête dans le référentiel du véhicule lorsque la pénétration de la tête dans le pare-brise est maximale. Nous en déduisons le WAD.

2.3. Plan d'expérience

Dans un premier temps, l'étude paramétrique va porter sur l'ensemble des facteurs présentés. Au vue du nombre important de variables d'entrées, déployer un plan d'expérience complet (full), c'est-à-dire tester chaque niveau de variable avec tous les autres niveaux est trop conséquent, au niveau du temps de calcul et de l'espace mémoire nécessaire.

Afin d'optimiser notre plan d'expérience, nous avons opté pour un plan fractionné, c'est-à-dire une fraction d'un plan complet, qui déploie le nombre minimal d'expériences nécessaires pour pouvoir tester au moins une fois toutes les variables entre elles. Le but est de conserver une quantité de données suffisante pour obtenir une bonne estimation des relations de dépendance, tout en allégeant notre calcul.

Une première analyse globale qualitative va faire ressortir les conclusions principales de cette étude paramétrique.

a) Impact piéton/véhicule

La figure 25 est la matrice de corrélation de notre étude.

Elle permet de jauger la corrélation entre les variables d'entrées et les réponses. Les indicateurs varient de -1 (corrélation négative=comportement opposé) et +1 (corrélation positive=comportement identique). Donc plus le coefficient est proche de 0, et moins il y a de corrélation entre les 2 facteurs. Au contraire, plus on est proche de 1 (ou -1), et plus l'interaction est forte.

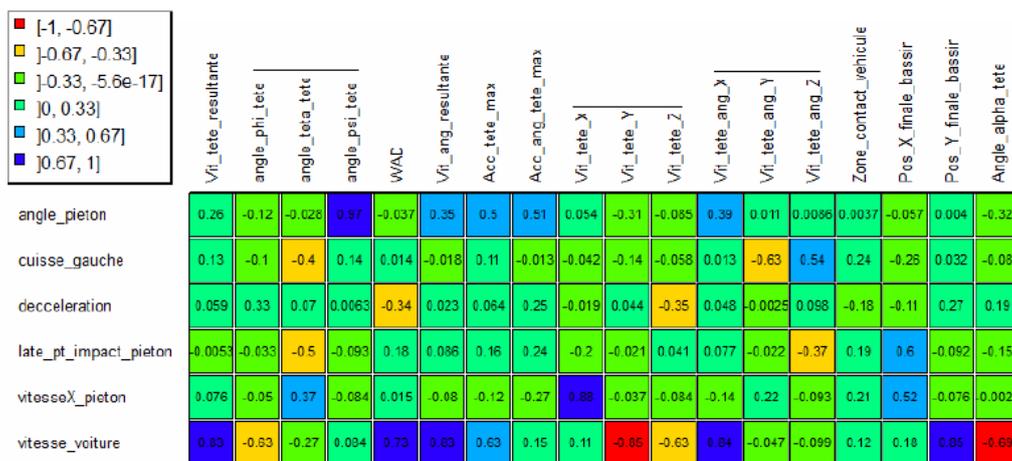


Figure 25 – Matrice de corrélation du choc véhicule

Tout d'abord, la première analyse de cette matrice permet de faire ressortir la variable majeure qui a le plus d'influence sur les résultats : la vitesse de la voiture. Elle a en effet une forte corrélation avec les vitesses linéaires et angulaires de la tête, le WAD, l'accélération de la tête, la projection longitudinale et aussi l'angle d'impact de la tête au moment du choc.

Vitesses d'impact de la tête

Les vitesses linéaires d'impact de la tête dépendent principalement de la vitesse du véhicule. Notamment les vitesses linéaires selon l'axe Y et Z. Plus la vitesse du véhicule est élevée et plus la tête va venir impacter violemment (avec une grande vitesse relative) ce dernier. La vitesse linéaire suivant l'axe vertical Z est aussi influencée par le freinage du véhicule. Plus le freinage sera fort moins la vitesse suivant Z sera importante.

La vitesse de la tête selon l'axe X est quant à elle logiquement influencée par la vitesse du piéton suivant cet axe (axe de déplacement du piéton).

La vitesse du véhicule est aussi le principal facteur ayant une influence sur les vitesses angulaires d'impact de la tête. Cette influence est surtout présente au niveau de la vitesse angulaire autour de l'axe X, ce qui est cohérent puisque le piéton vient s'enrouler autour de cet axe durant la phase de choc. Les vitesses angulaires autour des axes Y et Z sont influencées par la posture du piéton, c'est-à-dire les positions des bras et des jambes durant la marche.

Accélération tête

On remarque l'influence de l'angle du piéton sur l'accélération de la tête. Après analyse des interactions entre facteurs, on voit que l'effet de l'angle du piéton sur l'accélération dépend de la modalité de la vitesse de véhicule : plus la vitesse est élevée et plus l'angle du piéton pendant le choc va influencer sur l'accélération de la tête au moment de l'impact.

Vitesse angulaire

La posture du piéton, c'est-à-dire la position de ses jambes, a une influence sur les vitesses angulaires autour de l'axe y et z. Cette relation n'est pas aussi évidente que d'autres au vue de la matrice de corrélation, car le paramètre posture du piéton est modélisé par l'angle pris lors de la marche par la cuisse gauche, un angle qui n'a pas un échantillonnage évolutif linéaire comme les autres paramètres (ses valeurs successives sont 0.21, -0.40 puis -0.38).

Lorsque le plan défini par les deux jambes n'est pas parallèle au plan du pare-choc, le piéton va avoir tendance à pivoter autour de l'axe de la jambe impactée, de façon à ramener l'autre jambe vers le véhicule. Cette rotation entraîne des vitesses angulaires importantes autour des axes y et z (figure 26).

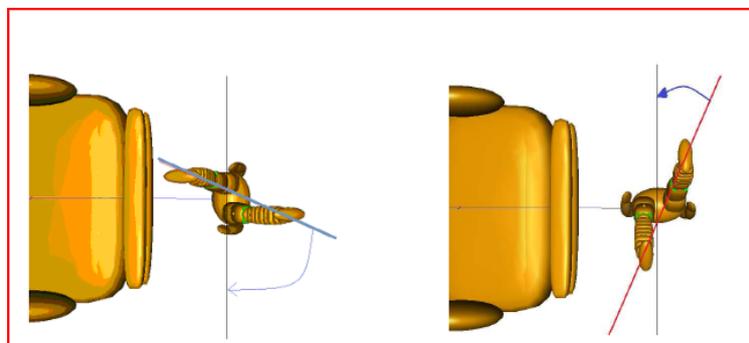


Figure 26 : Influence du plan formé par les jambes

WAD

Le WAD dépend aussi principalement de la vitesse du véhicule. Plus le véhicule aura une vitesse importante, plus la distance d'enroulement du piéton sera grande, donc plus la tête viendra impacter une partie haute du véhicule (principalement le haut du pare-brise).

D'une façon moins importante, le WAD semble aussi être dépendant de la décélération du véhicule puisque le WAD augmente lorsque le freinage augmente (figure 27).

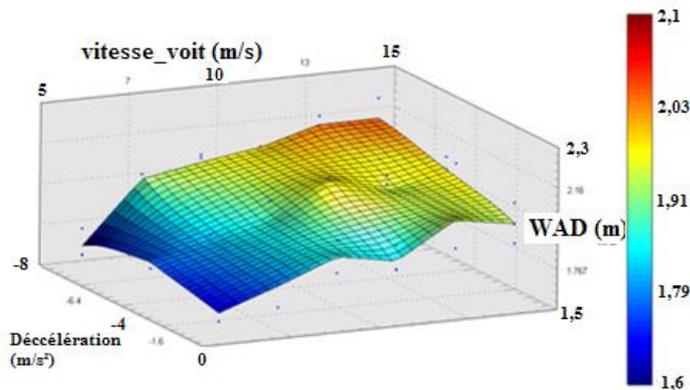


Figure 27 – Surface de réponse du WAD par apport à la vitesse de la voiture et à la décélération

Angle d'impact de la tête

L'angle α de la tête formé avec l'horizontale lors de l'impact est largement influencé par la vitesse du véhicule. Plus la vitesse du véhicule est importante et plus l'angle d'impact est faible. Ce qui est cohérent car plus la vitesse du véhicule est importante, et plus la composante en Y de la vitesse de la tête est importante devant la composante en Z, et donc l'angle alpha est faible. Les conditions de collision de la réglementation européenne sur la protection du piéton prévoient dans leurs conditions initiales d'essais sous systèmes un angle d'impact tête/pare-brise de 35°. L'angle d'impact tête/pare-brise prévu par les tests Euro NCAP est de 65°. Les résultats de cette étude ont montré qu'au niveau de l'impact tête, l'angle semble surévalué pour les essais Euro NCAP. Au vue de nos résultats, un angle d'impact compris entre 30° et 50° semble être plus cohérent (voir figure 28).

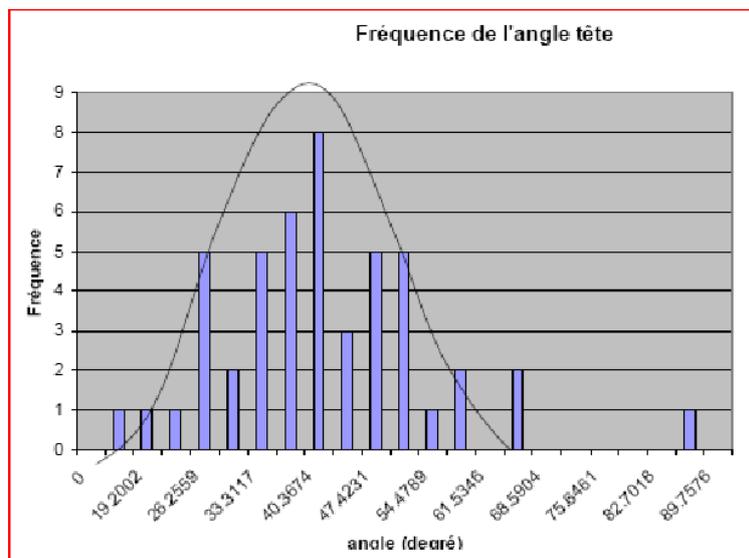


Figure 28 : Diagramme de fréquence de l'angle d'impact de la tête

Après analyse des facteurs croisés, on remarque que la décélération du véhicule influe sur l'angle α mais ceci sous l'influence de la vitesse du véhicule. Plus la vitesse du véhicule est importante, plus la décélération joue un rôle dans le résultat de l'angle de la tête lors de l'impact (figure 29). On le voit très bien sur la surface de réponse de l'angle en fonction de la vitesse du véhicule et la décélération.

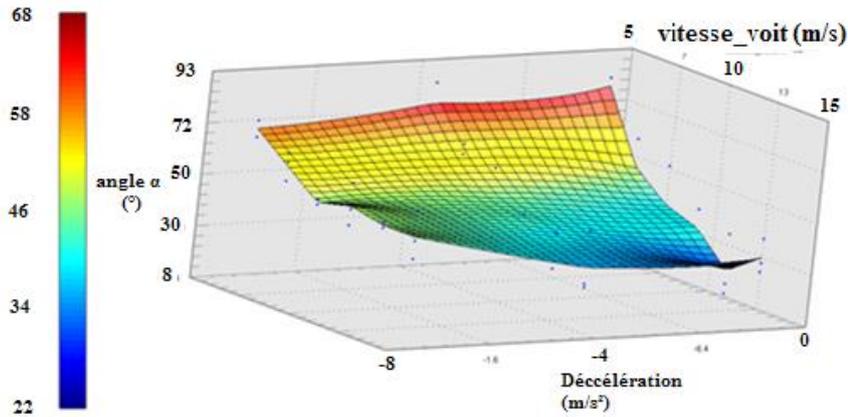


Figure 29 – Surface de réponse de l'angle tête par apport à la vitesse de la voiture et à la décélération

b) Impact piéton/sol

La matrice de corrélation de la chute au sol est plus difficilement exploitable que la précédente. On remarque une nouvelle fois l'influence dominante de la variable vitesse voiture.

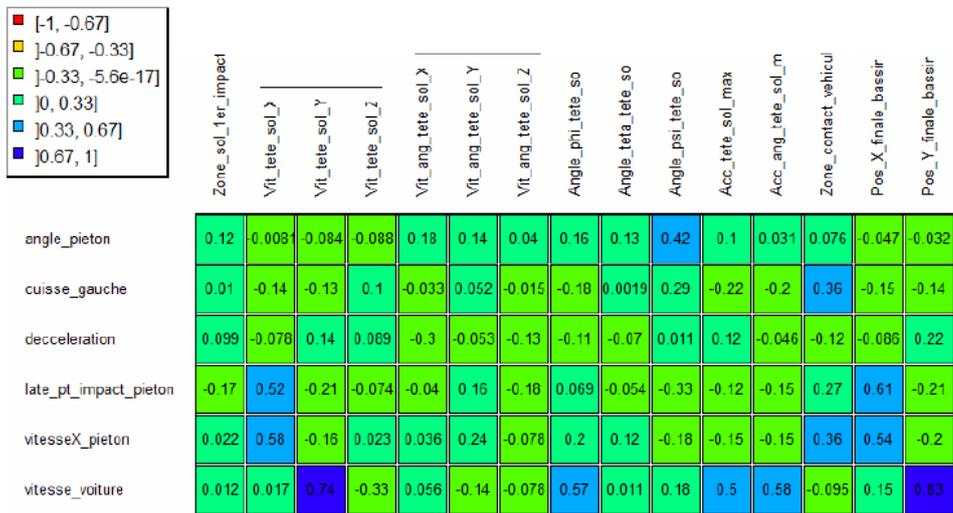


Figure 30 – Matrice de corrélation de la chute au sol

Vitesses d'impact de la tête

La vitesse suivant l'axe Y est logiquement influencée par la vitesse de la voiture, tandis que la vitesse suivant l'axe X est influencée par la position latérale du point d'impact et la vitesse du piéton. La vitesse la plus critique dans la chute au sol est bien sûr la vitesse

verticale, suivant l'axe Z. Mais aucun paramètre d'entrée ne semble avoir d'influence marquée sur cette vitesse.

Distance de projection longitudinale

La distance de projection longitudinale dépend positivement de la vitesse du véhicule au moment de l'impact, ce qui est cohérent en terme d'énergie. Plus le véhicule a de la vitesse, plus il restitue de l'énergie au piéton, et donc plus la distance de projection est importante.

Distance de projection latérale

Les 2 paramètres qui influent le plus sur la distance de projection latérale sont les 2 paramètres agissant suivant cet axe, soit la latéralisation du point d'impact et la vitesse de déplacement du piéton suivant cet axe.

Segments corporels du 1^{er} impact avec le sol

Les 2 principaux segments corporels les plus souvent impactés en premier lors de la chute au sol sont la tête et le bassin, respectivement 30% et 26% des simulations.

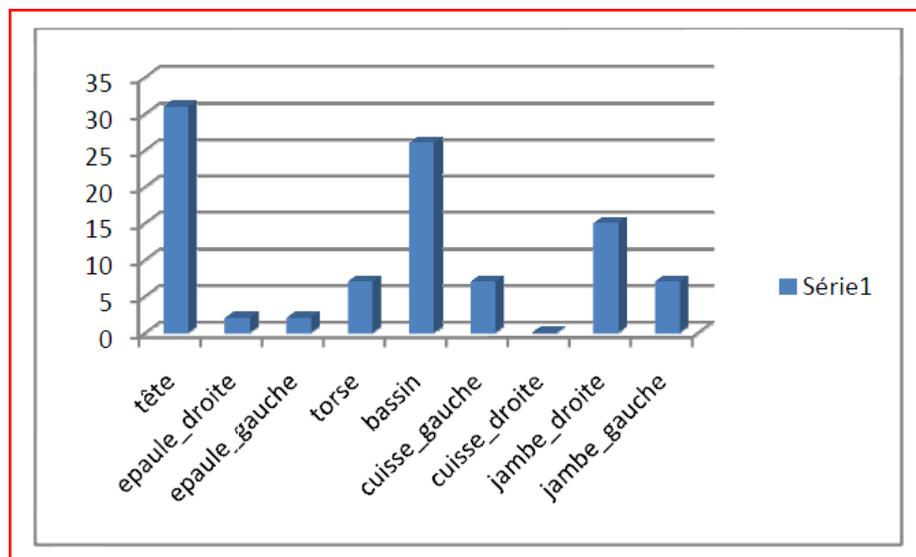


Figure 31 : Diagramme de fréquence des segments impactés en premier lors de la chute au sol

Ces deux zones sont donc les plus vulnérables lors de la chute au sol, car le premier segment corporel impacté est victime de l'accélération maximale.

c) Configuration les plus sévères

Au vu de l'ensemble des résultats de l'étude paramétrique, nous pouvons en déduire les configurations d'accidents les plus sévères en fonction des paramètres.

Pour le choc véhicule

Nous jugeons ici la sévérité par rapport aux résultantes en vitesse et en accélération de la tête. La vitesse de la voiture étant le paramètre le plus influent, la configuration la plus sévère est logiquement celle avec une vitesse de la voiture (15m/s soit 54km/h), et aucune décélération (pas de freinage). Le paramètre moins prévisible est l'orientation du piéton. Les configurations les plus sévères présentent un piéton impacté de dos au véhicule. On peut

expliquer ce résultat par le fait que durant l'impact latéral, il y a un autre choc en prendre en compte : celui de l'épaule. Celui-ci vient modifier et atténuer l'impact tête. Dans le cas d'un impact dorsal, seule la tête vient impacter le pare-brise. De plus, lorsque le piéton est impacté de dos, le corps s'enroule parfaitement autour de la carrosserie du véhicule sans grande résistance de sa part puisqu'il se situe dans l'axe de flexion naturel des genoux. Cette facilité d'enroulement peut provoquer un effet de fouet, et donc entraîner un impact tête sur le pare-brise d'autant plus fort. Ceci est confirmé par la matrice de corrélation, où une interaction est présente entre l'angle du piéton et l'accélération de la tête. Les autres facteurs comme la posture de marche ou la vitesse du piéton ne rentrent pas en compte.

Pour la chute au sol

La sévérité du choc est aussi jugée par rapport aux résultantes en vitesse et accélération de la tête. On retrouve certains paramètres similaires à la configuration la plus sévère au choc véhicule comme la vitesse véhicule, qui est logiquement maximale ici aussi. La sévérité de la chute au sol est difficilement analysable, puisqu'on regarde juste les vitesses et accélérations au niveau de la tête. Or, on observe seulement une chute au sol sur la tête (1^{er} impact) dans 30% des simulations (figure 32).

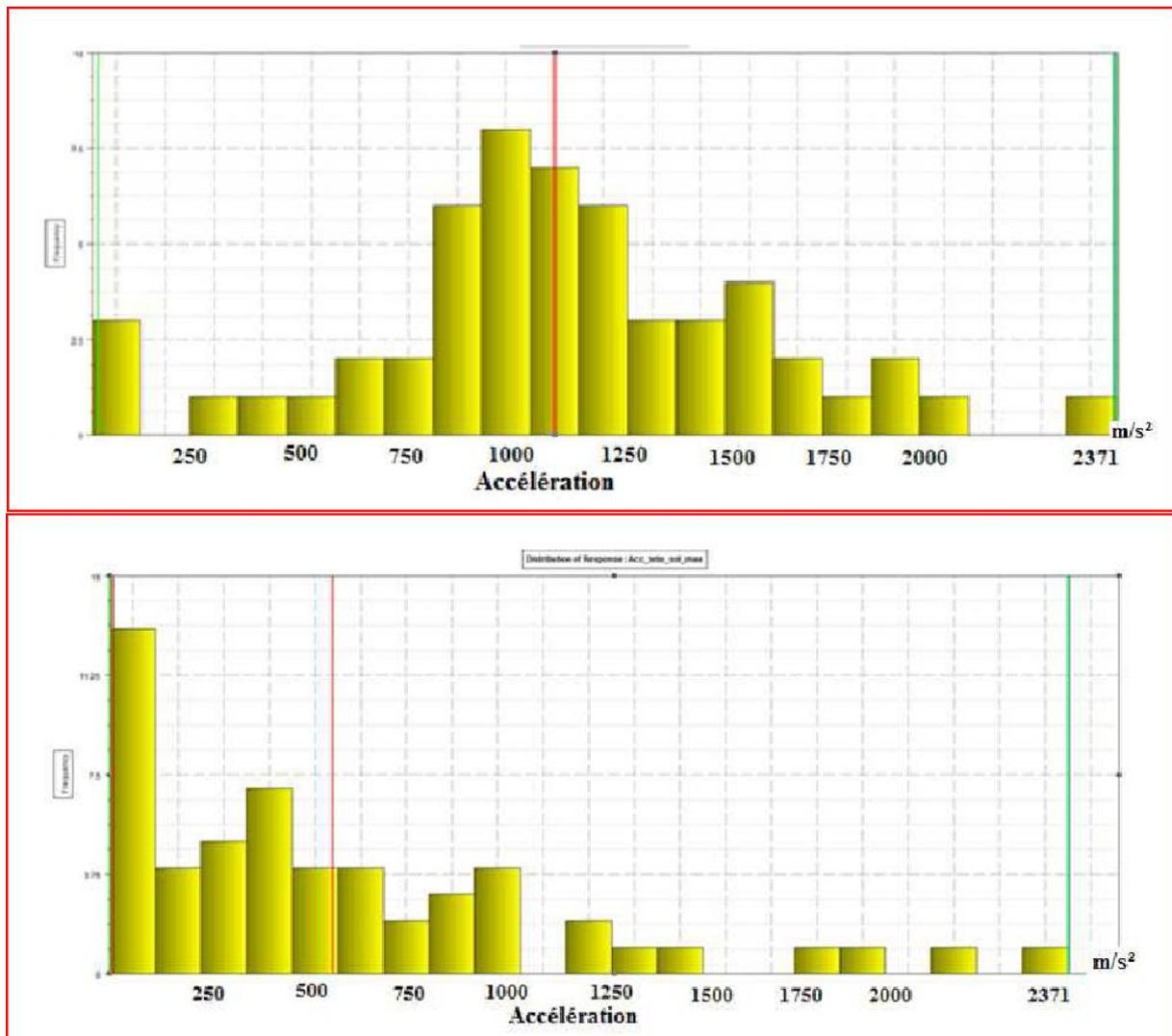


Figure 32 : Diagramme de fréquence des accélérations pour le choc véhicule (en haut) et pour la chute au sol (en bas)

Il faudrait relever et comparer les accélérations du segment corporel qui impacte le sol en premier. Mais cette méthode amènerait des comparaisons d'accélérations de segments différents (exemple : accélération tête avec accélération bassin), chose qui n'est pas comparable en termes de sévérité.

De plus, la matrice de corrélation montre qu'il existe peu de relation, hors mis la vitesse du véhicule, entre les paramètres d'entrée et les paramètres de sortie caractéristiques de la tête (accélération et vitesse). Il est donc difficile de mettre en avant une configuration critique. Les configurations qui sont le plus sévères pour la tête sont celles où le piéton est fortement projeté en hauteur, entraînant un atterrissage violent.

Cependant on peut extraire les valeurs d'accélérations et de vitesse de la tête durant cette chute au sol, et ainsi les comparer aux valeurs du choc véhicule.

	Max acc tête (m/s ²)	Max résultante vitesse (m/s)
Véhicule	2355	18,6
Sol	2371	17

Figure 33 – Comparatif des données maximales entre le choc véhicule et la chute au sol

Au niveau des maximums observés, on remarque une similitude des résultats entre les 2 impacts. La phase de chute au sol a donc les capacités de provoquer des lésions au niveau de la tête similaires à celles provoquées par le véhicule. Lorsqu'on regarde de plus près, en observant par exemple la dispersion des accélérations pour le choc véhicule et pour la chute au sol, on remarque une moyenne d'accélérations bien plus élevée dans le cas du choc avec le véhicule. Les violences d'impact sont donc en moyenne largement supérieures dans le choc avec le véhicule, mais certaines configurations peuvent présenter des accélérations dues à la chute au sol aussi importantes que celles causées par le choc véhicule.

Ce résultat est très intéressant, et alimente le débat « Est-ce le choc avec le véhicule ou la chute au sol qui est responsable des lésions observées? »

3. Deuxième analyse paramétrique étendue à 3 modèles de véhicules

A partir des informations collectées sur le premier plan d'expérience, un second plan d'expérience est proposé comprenant 6 paramètres à 3 niveaux, et un paramètre (la vitesse) à 6 niveaux. Considérant que le précédent plan d'expérience avait montré l'importance de la vitesse du véhicule sur l'influence des autres paramètres, nous avons choisi de ne pas fractionner cette variable, ainsi que la variable forme du véhicule. Nous avons donc un plan fractionné sur 5 variables, donnant 27 simulations (tableau 4) croisé à un plan complet sur les 2 variables restantes (vitesse véhicule et forme voiture).

Le plan obtenu compte 486 simulations (figure 34).

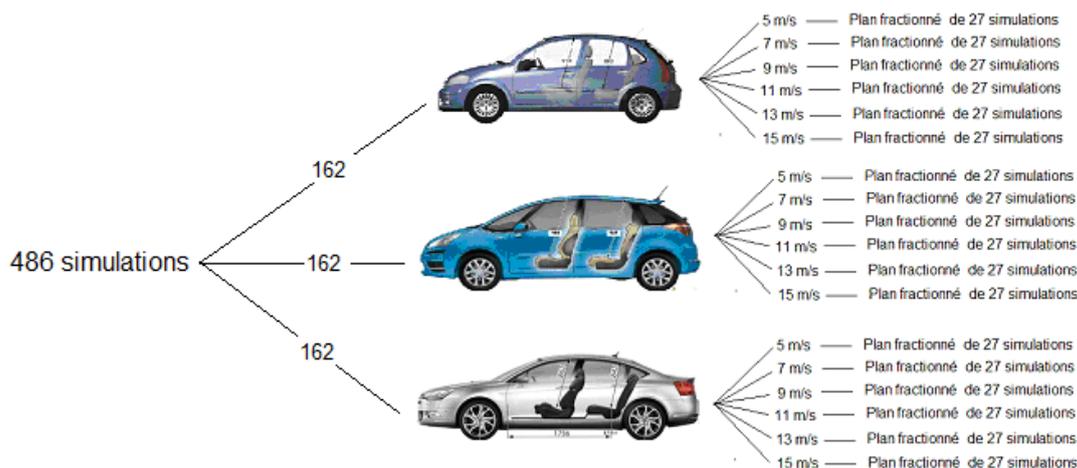


Figure 34 – Schéma du plan d'expérience

Tableau 4 – Plan fractionné de 27 simulations pour 5 variables

	X position (m)	angle piéton	position marche (%)	decceleration (m/s ²)	vitesse piéton (m/s)
1	-0,4	-90	30	8	0
2	-0,4	-90	50	4	1
3	-0,4	-90	0	0	2,8
4	-0,4	0	30	4	2,8
5	-0,4	0	50	0	0
6	-0,4	0	0	8	1
7	-0,4	90	30	0	1
8	-0,4	90	50	8	2,8
9	-0,4	90	0	4	0
10	0	-90	30	0	2,8
11	0	-90	50	8	0
12	0	-90	0	4	1
13	0	0	30	8	1
14	0	0	50	4	2,8
15	0	0	0	0	0
16	0	90	30	4	0
17	0	90	50	0	1
18	0	90	0	8	2,8
19	0,4	-90	30	4	1
20	0,4	-90	50	0	2,8
21	0,4	-90	0	8	0
22	0,4	0	30	0	0
23	0,4	0	50	8	1
24	0,4	0	0	4	2,8
25	0,4	90	30	8	2,8
26	0,4	90	50	4	0
27	0,4	90	0	0	1

L'exploitation des résultats a été décomposée en 4 phases correspondant aux 4 objectifs de cette tâche :

- Tout d'abord l'analyse des paramètres d'entrées les plus influents sur les sorties étudiées, afin de mieux comprendre et appréhender la mécanique du choc piéton.
- Nous avons ensuite essayé de comparer le choc tête/véhicule avec le choc tête/sol afin de pouvoir déterminer avec précision le rôle de la chute au sol dans le processus de l'accident piéton.
- Grâce aux différentes formes de véhicules pris en compte, nous avons par la suite étudié les différences d'agressivité entre les 3 faces avant de véhicules.
- Puis dans un dernier temps, nous nous sommes intéressés au choc bassin et à la comparaison de son impact avec le véhicule et avec le sol.

3.1. Paramètres les plus influents

Dans un premier temps, nous avons étudié la matrice de corrélation issue de cette étude paramétrique. Elle permet de jauger la corrélation entre les variables d'entrées et les réponses. Les indicateurs varient de -1 (corrélation négative=comportement opposé) et +1 (corrélation positive, comportement identique). Donc plus le coefficient est proche de 0, et moins il y a de corrélation entre les 2 facteurs. Au contraire, plus on est proche de 1 (ou -1), et plus l'interaction est forte. Cela permet de mettre en évidence l'influence des paramètres sur les sorties.

	WAD	Acc_tete_max_1er_impact	Acc_ang_tete_max_1er_impact	Vit_tete_1er_impact_x	Vit_tete_1er_impact_y	Vit_tete_1er_impact_z	Vit_ang_tete_1er_impact_x	Vit_ang_tete_1er_impact_y	Vit_ang_tete_1er_impact_z	Vit_torso_1er_impact_x	Vit_torso_1er_impact_y	Vit_torso_1er_impact_z	Vit_ang_torso_1er_impact_x	Vit_ang_torso_1er_impact_y	Vit_ang_torso_1er_impact_z	Angle_alpha_tete	zone_1er_impact_tete	Acc_3ms_tete	Acc_3ms_torse	Acc_3ms_baseir	HIC
X_position	0.15	-0.032	0.0059	-0.1	-0.063	0.054	-0.026	-0.044	-0.31	0.35	-0.12	0.099	0.017	0.054	-0.36	-0.14	0.35	-0.043	-0.086	0.022	-0.094
angle_pieton	-0.095	0.3	0.3	0.0037	-0.27	-0.12	0.32	0.11	0.012	-0.091	0.035	0.053	0.19	0.019	0.027	-0.24	-0.06	0.17	0.2	0.12	0.24
position_marche	-0.038	0.032	-0.057	0.14	-0.072	-0.059	0.028	-0.24	0.45	-0.13	-0.051	-0.14	0.061	-0.59	0.48	-0.03	-0.13	-0.033	-0.027	0.042	-0.015
decceleration	-0.56	0.075	0.17	0.071	0.091	-0.2	0.057	-0.053	0.13	0.038	-0.060	-0.1	0.073	-0.099	0.061	0.22	-0.001	0.002	-0.10	0.13	0.074
vitX_pieton	-0.049	0.058	0.0059	0.85	-0.025	-0.039	0.02	0.090	-0.009	0.75	-0.045	0.052	0.029	0.24	-0.096	-0.013	0.16	0.16	0.095	0.073	0.13
vitesse_voiture	0.54	0.56	0.12	0.027	-0.79	-0.64	-0.22	0.25	-0.12	0.082	-0.85	0.54	0.77	0.034	-0.074	-0.57	-0.15	0.65	0.66	0.29	0.58
Forme_voiture	0.052	-0.1	-0.027	-0.075	0.17	-0.098	-0.041	0.62	0.088	-0.063	-0.057	-0.17	-0.063	-0.0682	0.048	0.27	-0.097	-0.049	-0.19	0.059	-0.016

Figure 35 – Matrice de corrélation du choc véhicule

La matrice permet de faire ressortir l'influence prépondérante de la **vitesse du véhicule** sur la plupart des réponses. Elle a en effet une forte corrélation avec les vitesses linéaires et angulaires de la tête, le WAD, l'accélération de la tête, le HIC et aussi l'angle d'impact de la tête au moment du choc. D'autres paramètres ont également un rôle important comme la latéralisation du point d'impact, la décelération et la posture de marche du piéton mais leurs influences ne concernent que quelques paramètres de sorties bien spécifiques. La forme du véhicule n'apparaît pas, par contre, comme un paramètre prépondérant. L'angle piéton quant à lui se présente pour plusieurs réponses comme le second paramètre le plus influent, derrière la vitesse du véhicule.

Choc véhicule	Vitesse_impact_tête	linéaire Y	Vit_voiture	Vit_voiture	Vit_voiture
			angle piéton	angle piéton	angle piéton
		linéaire Z	Vit_voiture	Vit_voiture	Vit_voiture
			angle piéton	angle piéton	angle piéton
		Angulaire_X	Vit_voiture	Vit_voiture	Vit_voiture
			angle piéton	angle piéton	angle piéton
		Angulaire_Y Z	posture marche	posture marche	posture marche
	Acc_tête	Linéaire_max	Vit_voiture	Vit_voiture	Vit_voiture
	WAD		angle_piéton	angle_piéton	angle_piéton
			Vit_voiture	decceleration	decceleration
		Angle tête	decceleration	Vit_voiture	Vit_voiture
			Vit_voiture	Vit_voiture	Vit_voiture
	HIC		angle piéton	decceleration	decceleration
Vit_voiture			Vit_voiture	Vit_voiture	
Choc sol	Vitesse_impact_tête	linéaire Y	Vit_voiture	Vit_voiture	Vit_voiture
			linéaire Z	/	Vit_voiture
	Projection	Y	Vit_voiture	Vit_voiture	decceleration
			X	X_pos&Vit_pieton	X_pos&Vit_pieton
	Segment impacté		tête 30%	tête 31%	tête 26%
			bassin 26%	bassin 18%	

Tableau 5 – Comparaison des paramètres influents entre les 3 véhicules

Le tableau 5 répertorie pour chaque véhicule et pour certaines réponses le ou les paramètres jouant le plus grand rôle. En prenant la C3 comme référence, sont colorés en vert les paramètres influents identiques, et en bleu ceux qui diffèrent.

Globalement on retrouve les mêmes paramètres influents pour les différents véhicules. Qu'importe donc la géométrie de face avant qui est mis en jeu, il semble que ce soit toujours les mêmes paramètres (vitesse voiture, angle et posture piéton) qui jouent le plus grand rôle dans la variation des paramètres de sorties tels que la vitesse d'impact ou l'accélération de la tête.

3.2. Comparaison des impacts tête/véhicule et tête/sol

3.2.1 Head Injury Criteria

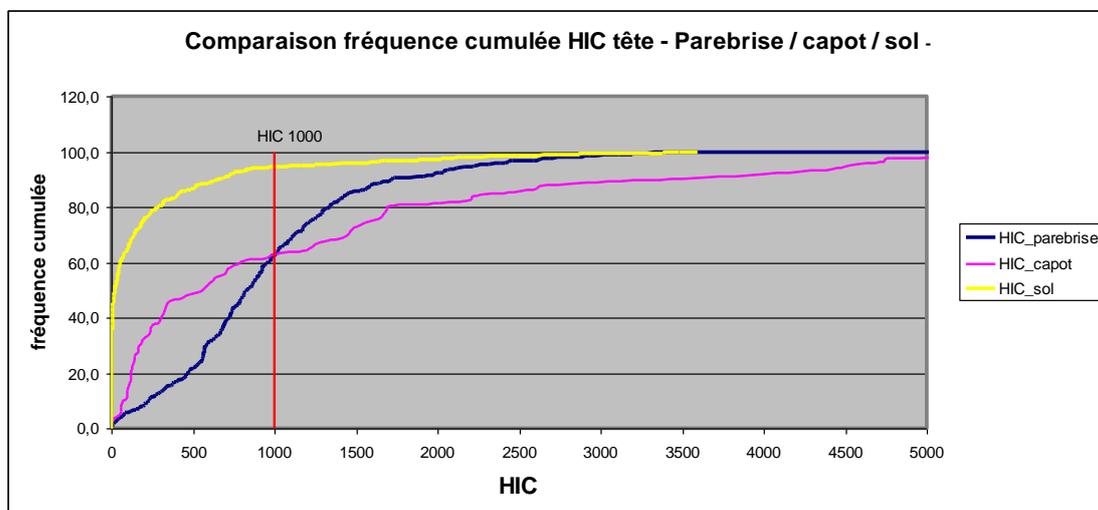


Figure 36 – Fréquence cumulée HIC

Les courbes ci-dessus présentent les valeurs de HIC en fréquences cumulées induites par le sol et le véhicule. Les 3 véhicules ainsi que toutes les vitesses d'impacts sont ici pris en compte.

Au travers de ce graphique, plusieurs conclusions peuvent être avancées :

-au niveau véhicule, seulement 60% des impacts entraînent un **HIC inférieur à 1000**.

- plus de 90% des impacts tête/sol entraînent un **HIC inférieur à 1000**.

Le choc contre le sol semble donc entraîner des HIC bien inférieurs au HIC que provoque le choc avec le véhicule. L'impact au sol apparaît ici beaucoup moins sévère pour la tête.

3.2.2 Angle d'impact de la tête par rapport au plan de la surface impactée

L'angle (en degrés) est calculé en fonction de la vitesse relative du centre de gravité de la tête par rapport au véhicule, au moment où la pénétration de la tête avec le véhicule devient non nulle. C'est l'angle formé par le vecteur vitesse et la surface de contact.

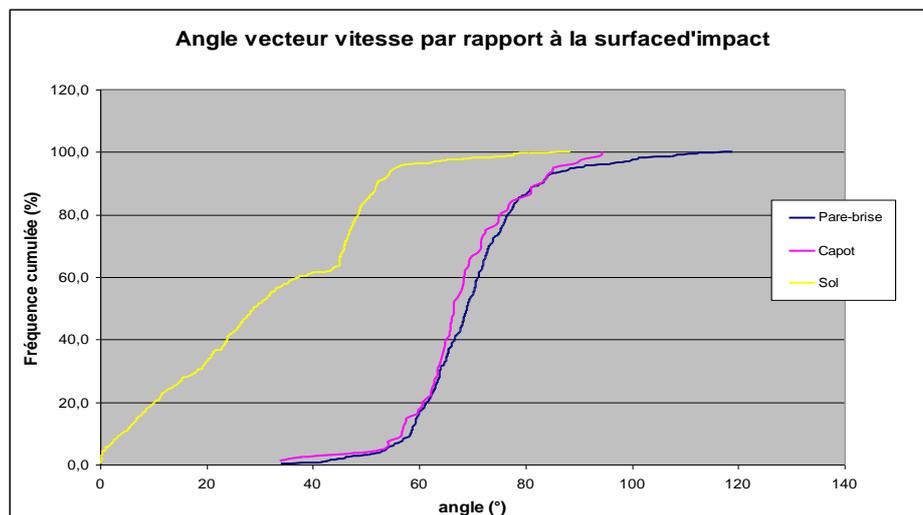


Figure 37 – Fréquence cumulée des angles d'impacts tête

Globalement, les angles d'impacts observés au niveau du sol sont largement inférieurs à ceux observés sur le véhicule. Plus le vecteur vitesse de la tête est proche de la normale (90°) et plus l'impact est violent. Les impacts observés au sol sont donc potentiellement moins agressifs que les impacts véhicules, ils s'effectuent en effet de façon plus tangentielle à la surface d'impact.

3.2.3 Angle d'impact de la tête par rapport à l'horizontale

L'angle α (en degrés) est calculé en fonction de la vitesse relative du centre de gravité de la tête par rapport au véhicule, au moment où la pénétration de la tête avec le véhicule devient non nulle. C'est l'angle formé par le vecteur vitesse et l'horizontale.

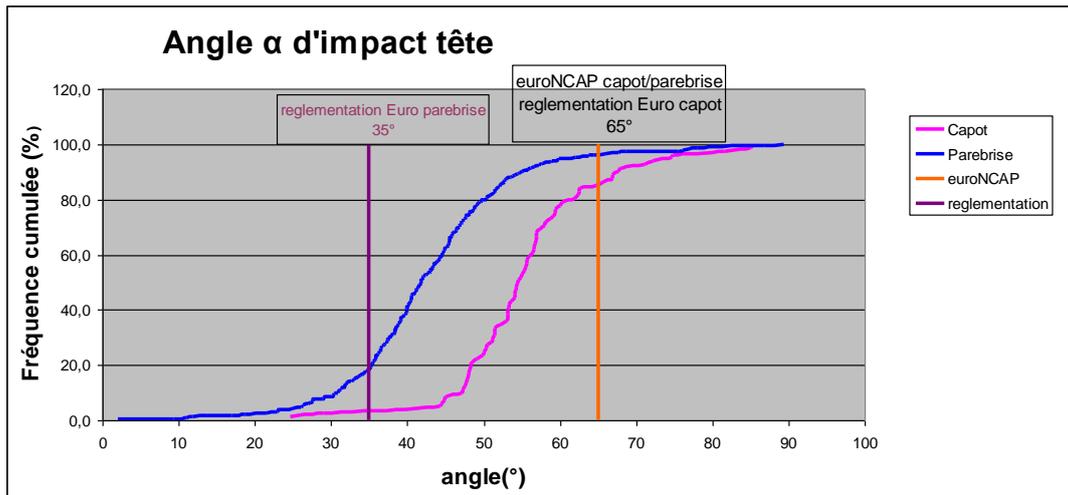


Figure 38 – Fréquence cumulée des angles d’impacts tête par rapport à l’horizontale

Une fourchette d’angle d’impact tête peut être mise en avant.

En effet 80% des impacts capot se font avec un angle α tête compris entre 40° et 60°, et près de 80% des impacts pare-brise se font avec un angle α tête compris entre 30° et 50°.

On peut donc constater que les angles d’impacts pour les essais sous-systèmes dans la réglementation et euroNcap sont en dehors de ces fourchettes. En effet, l’euroNcap utilise pour l’impact capot et pour le pare-brise un angle de 65°. Or, plus de 95% des impacts pare-brise se font avec un angle inférieur à cette valeur, et 85% pour les impacts capot. La réglementation quant à elle utilise un angle de 35° pour les impacts pare-brise, une valeur plus proche des valeurs observées sur l’ensemble des simulations mais qui reste tout de même inférieure à 80% des chocs. Cette étude confirme cependant la nécessité d’avoir 2 angles différents pour l’impact capot et pour l’impact pare-brise.

3.2.4 Vitesses normales au plan d’impact

Pour quantifier en termes de vitesse d’impact le choc de la tête, nous avons calculé la vitesse normale de la tête au plan d’impact. C’est en effet cette composante normale au plan d’impact qui est à considérer pour juger de la violence du choc.

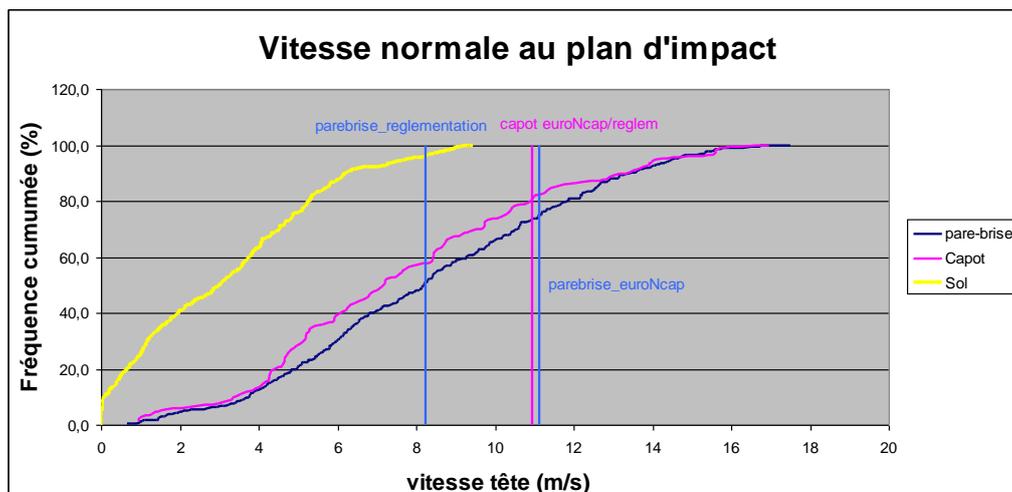


Figure 39 – Vitesse tête normale au plan d’impact

Les vitesses d'impacts au sol sont moins importantes. En effet presque 100% des vitesses normales au sol sont inférieures à 8m/s, alors que 8m/s est la vitesse normale moyenne d'impact sur le véhicule.

Les vitesses moyennes d'impact sont :

- capot: 7.73 m/s
- pare-brise:8.34m/s
- sol: 3.14 m/s

Au niveau des vitesses normales utilisées dans les tests standards, les valeurs obtenues avec les simulations semblent cohérentes avec celles-ci, notamment pour la réglementation au niveau du pare-brise.

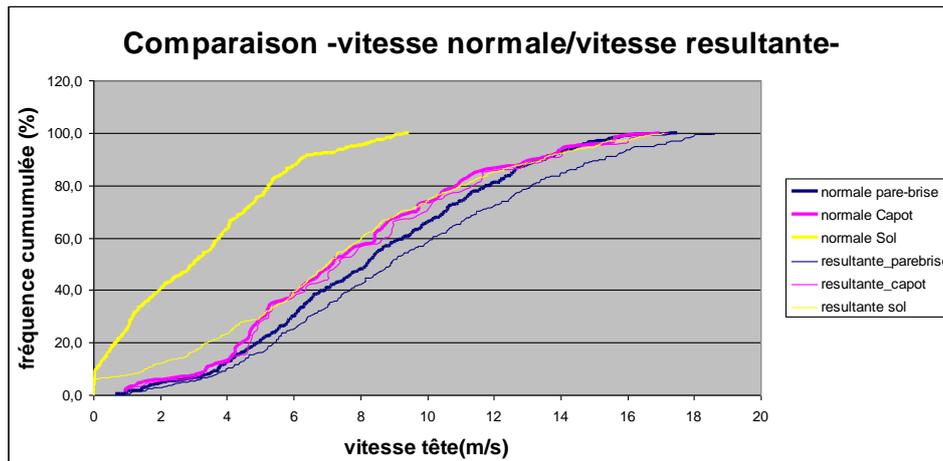


Figure 40 – Vitesse tête normale au plan d'impact et vitesse résultante

Ce graphique permet d'illustrer la composition normale et tangentielle des vitesses tête/véhicule et des vitesses tête/capot. L'impact tête/sol se déroule donc de façon très tangentielle au plan d'impact en comparaison aux impacts véhicules qui sont principalement normaux au plan. Cela confirme bien les observations effectuées avec les angles d'impacts. La vitesse résultante tête/sol est proche des vitesses résultantes tête/véhicule, d'où la nécessité de s'intéresser plus précisément aux vitesses normales plutôt qu'aux vitesses résultantes.

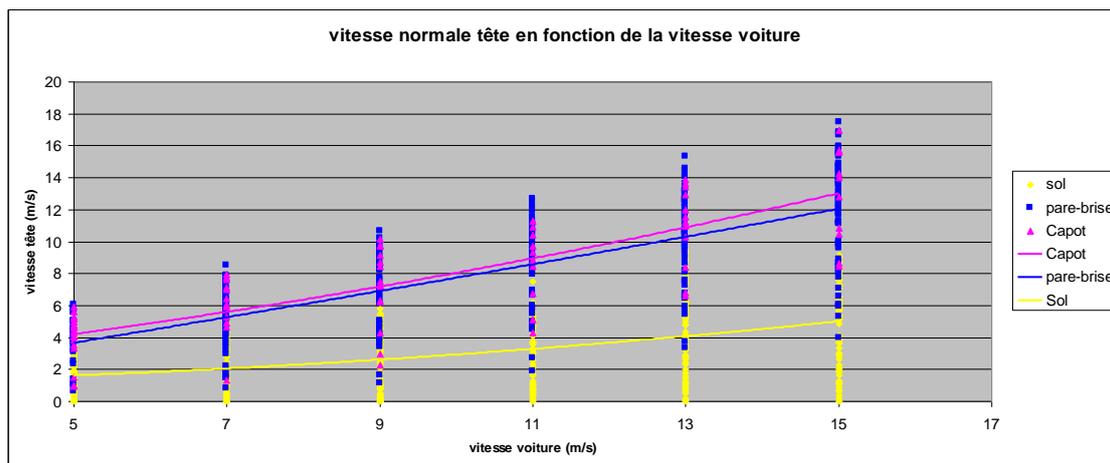


Figure 41 – Vitesse tête normale au plan d'impact en fonction de la vitesse véhicule

Les courbes de tendances tracées ci-dessus montrent l'évolution des vitesses normales d'impact de la tête. Les vitesses tête/sol sont largement inférieures aux vitesses tête/véhicules. De plus, l'augmentation de la vitesse véhicule provoque une augmentation plus importante des vitesses d'impact contre le véhicule que contre le sol.

3.3. Comparaison des 3 véhicules : C3, C4, C5

Le but de cette partie est de comparer l'agressivité vis-à-vis du piéton de différentes faces avant de véhicules. Les 3 véhicules possédant les mêmes propriétés mécaniques, cette comparaison est purement géométrique, axée sur les différences de formes des faces avant.

3.3.1 Head Injury Criteria

La figure 42 montre les 3 courbes des fréquences cumulées pour le HIC à l'allure des courbes exhibent le même profil et semblent très proches on observe néanmoins des différences induites selon le véhicule. Notamment que 60% des chocs pare-brise entraînent un HIC < 1000 pour la C3 et la C4, alors que c'est 75% des impacts pour la C5, une différence qui montre la tendance du piéton à venir impacter moins violemment le pare-brise dans le cas d'un grand véhicule à capot long du style C5.

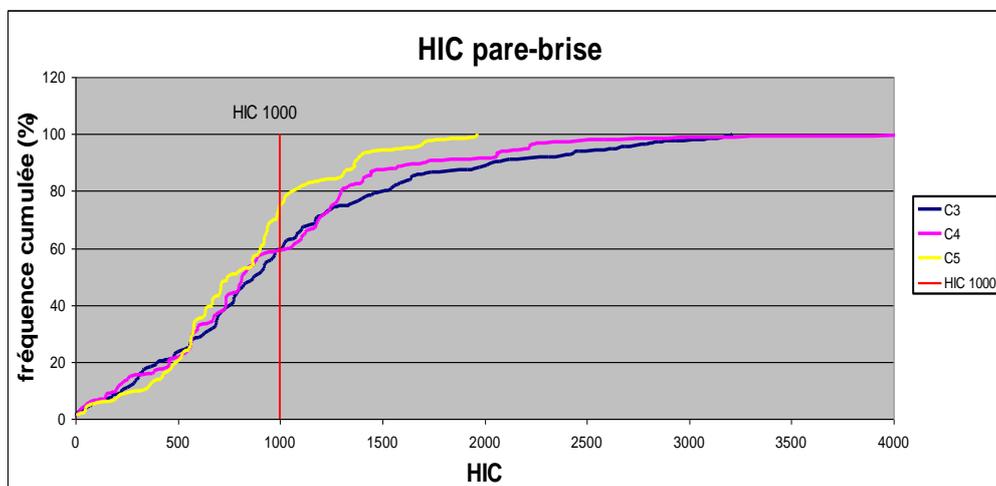


Figure 42 – HIC pare-brise des 3 véhicules

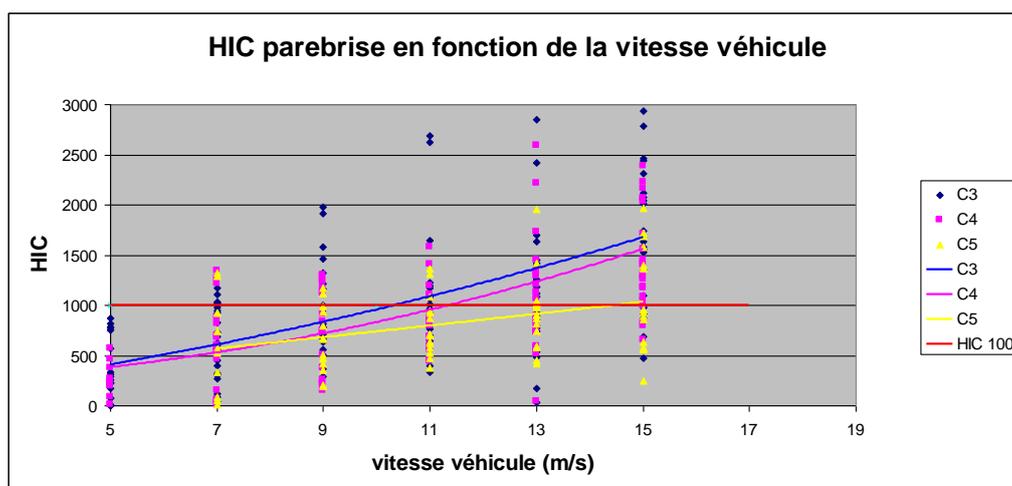


Figure 43 – HIC pare-brise des 3 véhicules en fonction de la vitesse véhicule

En s'intéressant à l'évolution du HIC pare-brise pour les 3 véhicules en fonction de la vitesse véhicule (figure 43), on remarque tout d'abord la tendance prévisible et mis en avant par la

matrice de corrélation à l'augmentation du HIC avec la vitesse voiture. Mais cette dépendance à la vitesse véhicule est d'autant plus marquée pour la C3 et la C4. De plus, très peu de valeurs de HIC pour la C5 (moins de 20%) dépassent la barrière du HIC 1000.

3.3.2 Vitesses normales au plan d'impact

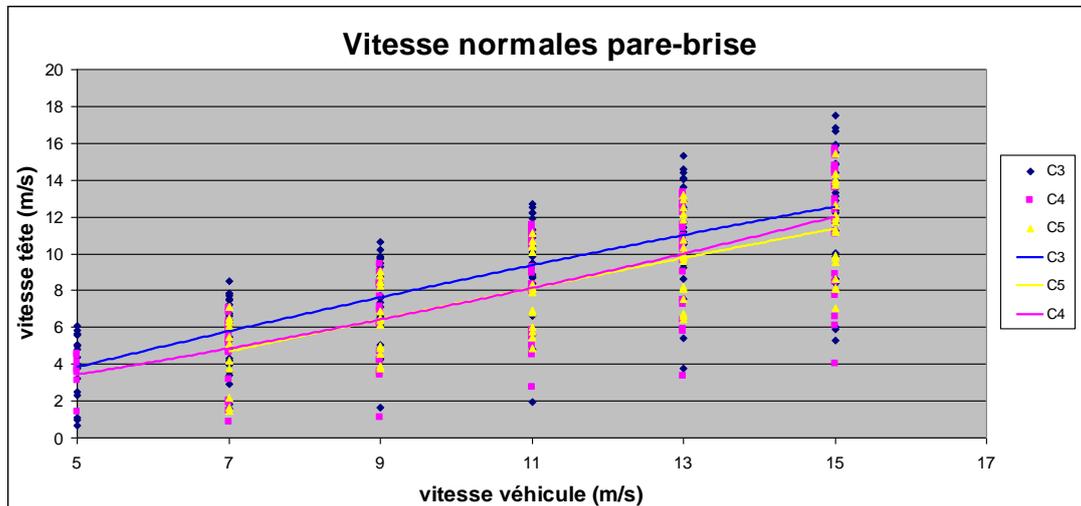


Figure 44 – Vitesses normales des 3 véhicules en fonction de la vitesse véhicule

Globalement, encore une fois les 3 courbes montrent la même tendance. On peut seulement remarquer que les vitesses normales au pare-brise de la C3 sont plus élevées. Ceci peut être expliqué par le fait que le pare-brise de la C3 étant plus incliné, le cône d'angle impact tête est plus proche de la normale.

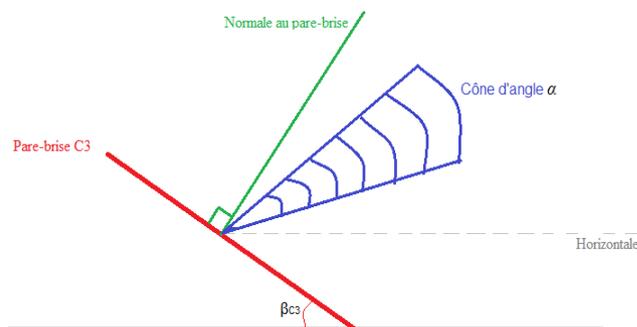


Figure 45 – Configuration d'impact pour la C3

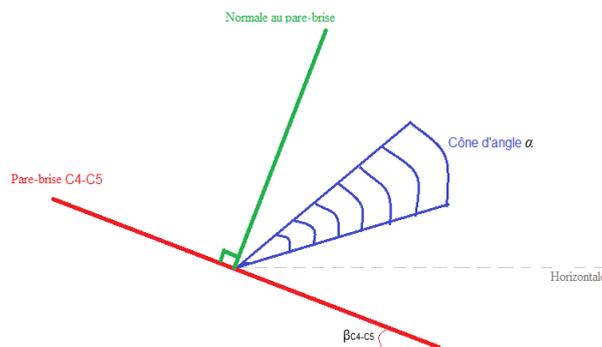


Figure 46 – Configuration d'impact pour la C4 et C5

3.3.3 Angle α d'impact

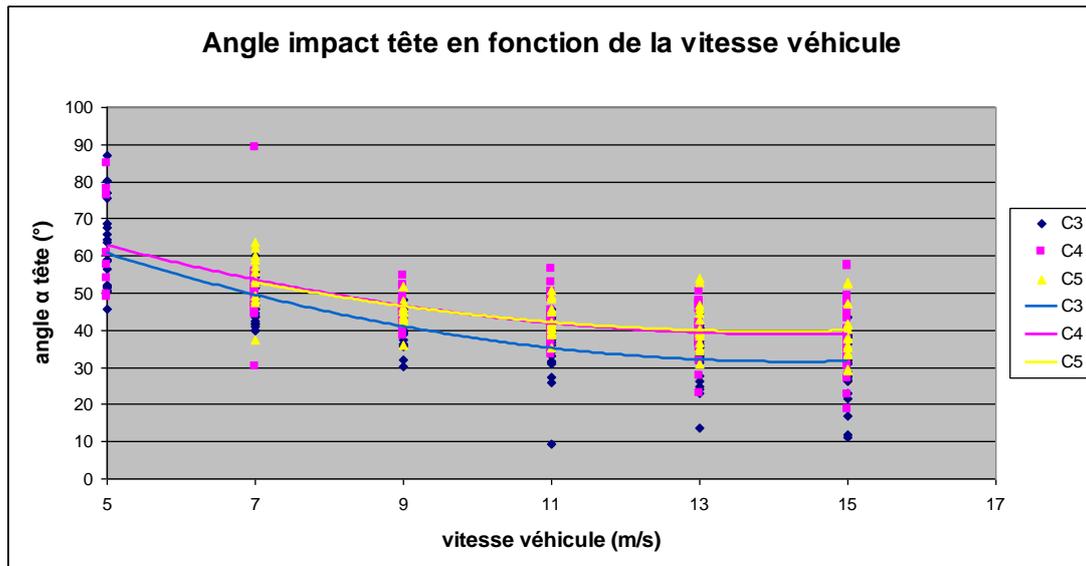


Figure 47 – Angle α d'impact tête sur le pare-brise des 3 véhicules en fonction de la vitesse véhicule

La figure 47 permet de voir l'évolution de l'angle α avec la vitesse véhicule. Plus la vitesse du véhicule au moment de l'impact est élevée et plus la tête va venir impacter le pare-brise de façon horizontale (avec moins d'angle).

Cet effet est d'autant plus observable avec la C3. Le capot court de celle-ci n'entraîne pas la même rotation du corps qu'avec des capots plus longs. La tête prend donc moins une trajectoire verticale, et vient impacter le pare-brise avec un angle α plus faible.

3.4. Comparaison des impacts bassin/véhicule et bassin/sol

Lors de la chute au sol, le bassin est un élément très vulnérable car :

- après la tête, le segment le plus impacté.
- dans 13% des simulations est le premier segment corporel impacté

Nous avons essayé, tout comme la tête, de comparer le choc du bassin avec le véhicule et avec le sol.

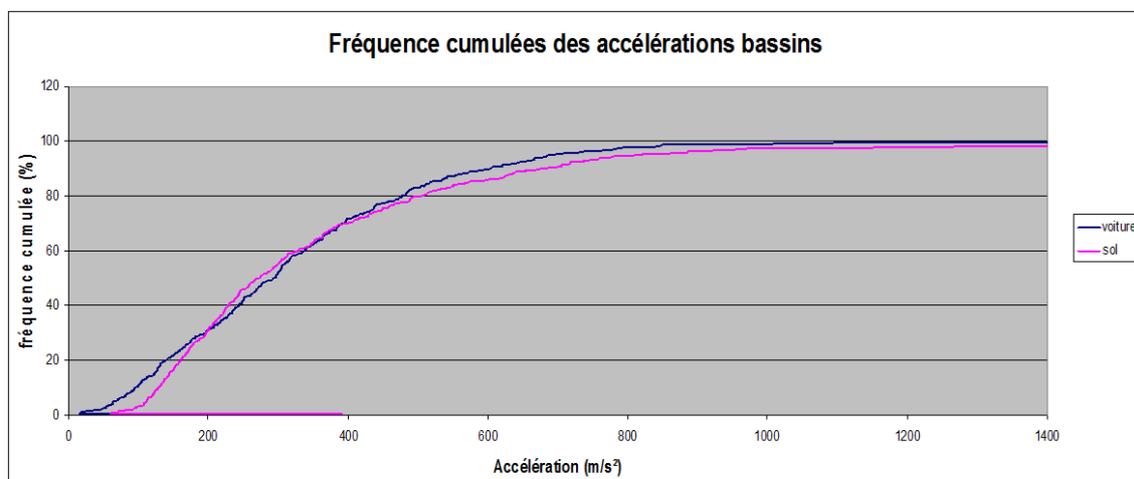


Figure 48 – Fréquence cumulée des accélérations bassin

Les courbes d'accélération du bassin lors du choc voiture et lors du choc sol sont très proches (figure 48). On ne retrouve pas la tendance observée pour le segment tête à savoir un choc véhicule plus agressif.

Le sol se présente donc comme potentiellement aussi agressif que le véhicule pour ce segment corporel.

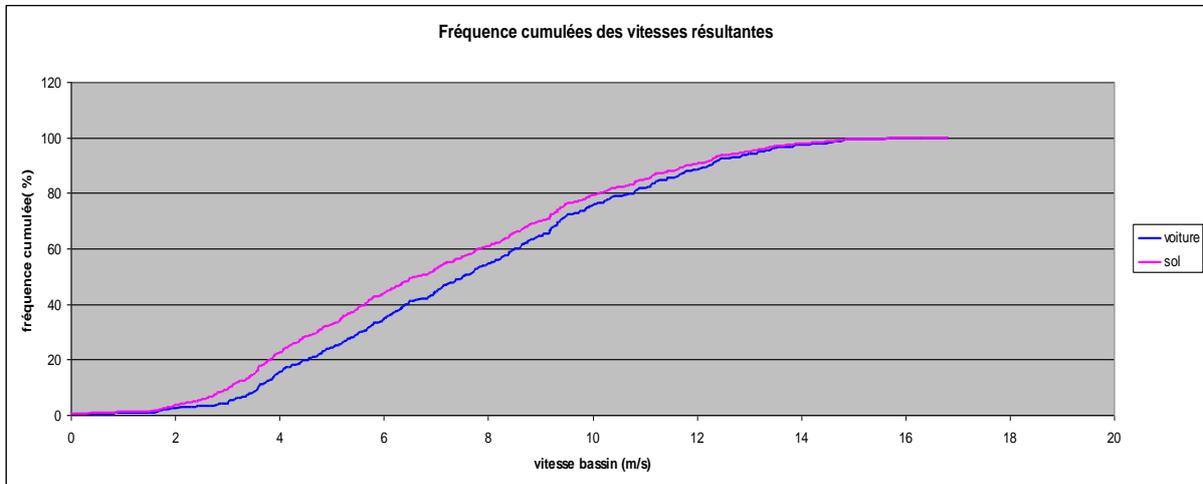


Figure 49 – Fréquence cumulée des accélérations bassins

En terme de vitesse d'impact, on observe aussi des courbes similaires signe que les vitesses d'impacts observées au niveau de l'impact véhicule sont comparables à celles observées au niveau de l'impact sol.

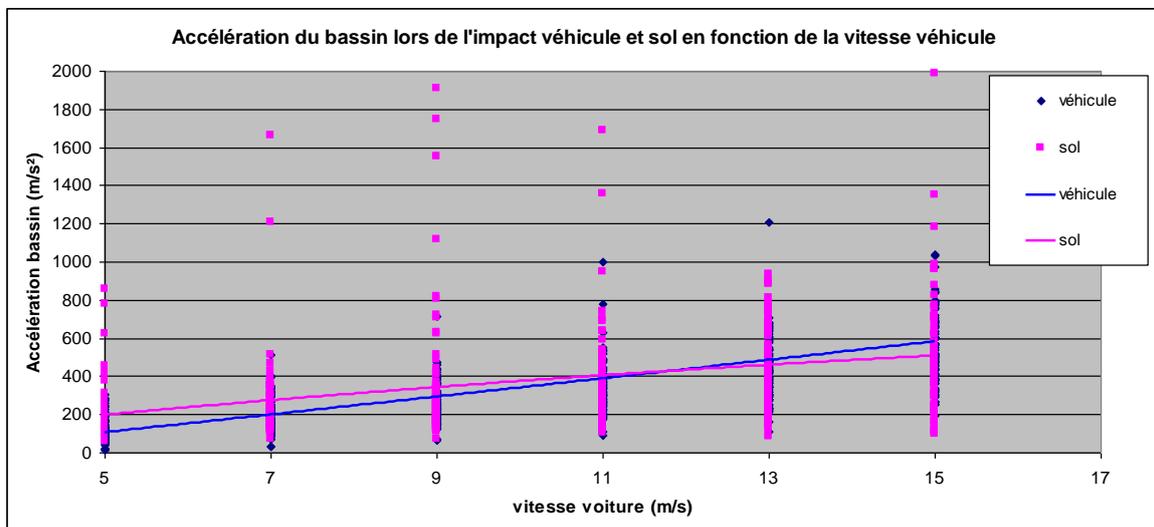


Figure 50 – Accélérations bassin en fonction de la vitesse véhicule

Les courbes de tendance sont très proches. Jusqu'à une vitesse véhicule de 11m/s, les accélérations lors de la chute au sol sont légèrement supérieures. Au delà de cette vitesse, la tendance s'inverse.

On remarque également que certaines configurations peuvent être très agressives pour le bassin puisque l'on observe des accélérations pouvant aller jusqu'à 2000ms^{-2} (200g) lors de la chute au sol.

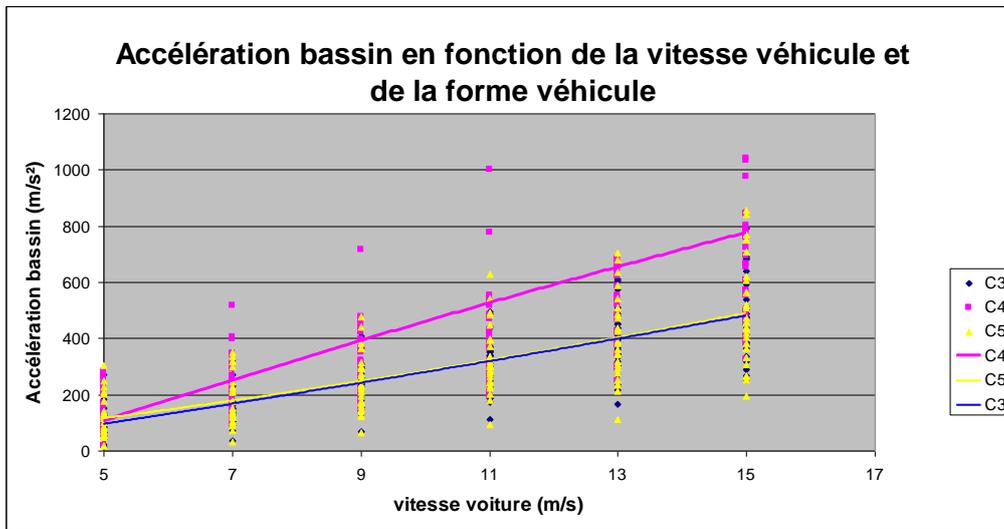


Figure 51 – Accélérations bassin en fonction de la vitesse véhicule et de la forme du véhicule

La comparaison des accélérations causées par les 3 différents véhicules permet de distinguer le véhicule C4. On remarque en effet que la vitesse du véhicule entraîne une plus grande croissance de l'accélération provoquée par la C4 sur le bassin. Ce résultat est intéressant et montre l'influence que peut avoir la géométrie de la face avant du véhicule. Le capot plongeant de la C4 semble venir impacter plus directement et donc plus violemment le bassin du piéton.

On peut l'illustrer par une image, pris dans la même configuration d'accident, pour les 3 véhicules différents. On voit ci-dessous le bassin (représenté en jaune) durant le choc. Seul pour la C4, la hauteur du véhicule entraîne un impact du bassin directement sur la calandre.

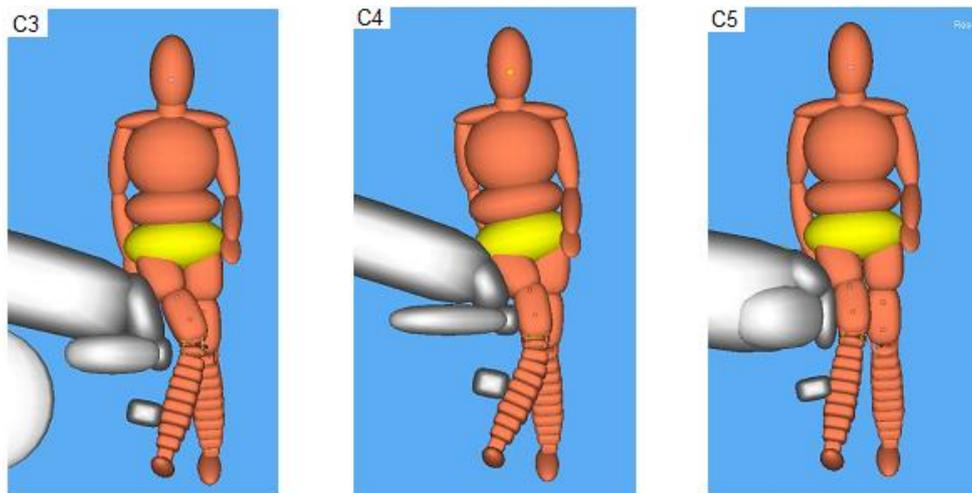


Figure 52 – Impacts bassin sur les 3 véhicules

4. Conclusion

Le couplage de l'approche numérique et expérimentale effectué dans un premier temps nous a permis de nous assurer de la conformité et de la bio fidélité de notre modèle. Tant sur le point qualitatif (cinématique de la simulation) que sur le point quantitatif (valeurs capteurs) le modèle obtenu était très proche de l'essai réel. Aussi, la validation de notre modèle par rapport à la chute au sol permet de pouvoir dissocier les conséquences lésionnelles de la chute au sol de celles induites par le choc contre le véhicule.

Une connaissance précise des relations entre les différents paramètres du modèle est indispensable pour une bonne compréhension des phénomènes mis en jeu lors d'accidents impliquant un véhicule et un piéton. L'étude paramétrique réalisée dans un second temps entre donc dans cette démarche d'explication de la variabilité de la condition d'accident à partir de la simulation numérique

On a ainsi mis en évidence le rôle prépondérant de la vitesse de véhicule sur la majorité des paramètres de sortie. En plus de cette influence conséquente, la vitesse du véhicule joue aussi un rôle sur les influences des autres paramètres. Certains paramètres ont un effet sur des facteurs de sortie mais de façon dépendante à la vitesse du véhicule. D'autres facteurs se sont révélés jouer un rôle non négligeables, notamment l'angle du piéton et la posture de marche.

De plus, l'étude paramétrique nous a permis de mettre en évidence un corridor d'angle tête/pare-brise, et ainsi montrer que le test standard Euro NCAP d'évaluation de la conformité des faces avant des véhicules n'est pas forcément en phase avec la réalité.

En ce qui concerne l'impact de la tête du piéton, les résultats de cette étude montrent qu'il apparaît globalement plus violent lors du choc contre le véhicule que lors de la chute au sol. En effet, ce dernier est plus tangentiel à la surface d'impact que lorsque la tête percute le véhicule. Par contre, en ce qui concerne le bassin, cette tendance n'existe plus puisque les deux impacts apparaissent comme similaires.

Chapitre 3

Conditions aux limites et variabilité de l'impact tête lors du choc piéton

1. Influence des conditions aux limites de la tête lors de reconstruction de traumatismes crâniens de piétons

1.1. Introduction

L'évaluation de la protection des piétons lors d'un impact avec un véhicule a amené à utiliser des sous-systèmes libres, comme les têtes ISO (UNECE, 2009, EuroNCAP, 2004). Dans ces tests, les formes de tête rigides adultes ou enfant sont impactées sur le capot ou pare-brise du véhicule, afin d'évaluer le potentiel lésionnel d'un tel impact. Pour la reconstruction de cas réels d'accident piéton, ces tests de sous-systèmes ont été utilisés dans le but de démontrer la sévérité des impacts et d'évaluer les critères des tests réalisés (Anderson *et al.* 2002).

Lors d'un accident réel piéton, la tête impactant une surface ne peut être considérée comme un sous-système libre et présente des contraintes du fait de sa liaison au reste du corps. La méthodologie utilisée pour la simulation des traumatismes crâniens du piéton aurait une influence sur la réponse de la tête, selon que l'on considère ou non les conditions limites au niveau du cou. Cette méthodologie influencerait de même les critères de lésion de la tête définis pour un tel modèle. Deck *et al.* (2008) et Takhounts *et al.* (2008) ont proposé des limites de tolérance pour les lésions de la tête lors d'un impact, limites basées sur un modèle EF de la tête ne prenant pas en compte les conditions aux limites de la tête. Kleiven en 2007 présente un modèle de tête-cou, sans couplage avec le thorax. Peu d'études ont été menées concernant ces conditions aux limites de la tête. Ishikawa *et al.* (2003) et Okamoto *et al.* (2000, 2006) ont effectué des tests de crash avec un impacteur normatif et un mannequin sur des profils avant de différents véhicules. Les résultats ont montré une différence pour les deux types de tests avec deux différentes conditions aux limites de la tête. Leur conclusion générale est que les procédures actuelles concernant les tests de sous-systèmes devraient être améliorées afin de mieux représenter les conditions d'un accident réel.

Dans le cadre du projet ASP, ont été étudiées l'influence des conditions aux limites de la tête sur la réponse de la tête à l'impact de reconstructions d'accidents réels impliquant un piéton et un véhicule, puis la pertinence des essais sous-systèmes actuellement en vigueur. Ainsi, quatre conditions limites différentes avec des chargements différents appliqués à la tête sont considérées sur un modèle de piéton sous simulation multibody (MBS) et sous méthode éléments finis (FE). Les conditions d'impact de la tête en termes d'accélération linéaires et angulaires, sont implémentées dans le modèle Eléments Finis de la Tête de l'Université de Strasbourg (SUFEBM) sous le code Radioss.

1.2. Méthodologie

Les reconstructions multi-corps ont été réalisées avec le logiciel MADYMO[®] afin de reproduire la cinématique du piéton pour chacun des huit cas d'accident provenant de la base de données CASR (Centre for Automotive Safety Research d'Adélaïde – Australie). Les reconstructions éléments finis ont été simulées à l'aide du logiciel RADIOSS. Les accélérations linéaires et angulaires des têtes estimées par les reconstructions MBS ont été implémentées dans les reconstructions EF. Pour chaque cas, les propriétés de contact pour les impacts de la tête ont été vérifiées. Huit cas d'accidents piétons ont été reconstruits et quatre différentes configurations pour les conditions limites de la tête ont été implémentées dans les deux modèles, multi-corps et éléments finis. Les réponses mécaniques de la tête – accélérations linéaires et angulaires maximales de la tête, HIC et les critères SUFEHM – ont été évaluées pour chaque cas pour chaque différente configuration corporelle.

La méthodologie appliquée dans cette étude comportait plusieurs phases :

- Collecte des données d'accident,
- Modélisation MBS de la collision,
- Reconstruction physique de l'impact tête et jambe à l'aide de tests d'impacteurs afin de caractériser la raideur des surfaces impactées du véhicule,
- Simulation MBS afin d'estimer l'accélération de la tête et autres paramètres mécaniques nécessaires,
- Simulation EF de l'impact de la tête afin de déterminer la réponse intracrânienne pour chaque cas,
- Simulation MBS et EF complémentaires afin d'étudier l'effet des conditions limites de la tête sur la cinématique et les réponses intracrâniennes du piéton.

Quatre configurations corporelles représentant diverses conditions aux limites de la tête (Figure) ont été implémentées dans les reconstructions MBS. Les configurations ont été obtenues en désactivant certains joints du modèle 5 ms avant l'impact de la tête. Les joints désactivés permettent de déconnecter la région proximale du corps de la région distale intéressée. Aucune force n'est ainsi transmise par le joint, et la partie distale est libre de tout mouvement indépendant du reste du corps. Les quatre configurations sont décrites ainsi :

- Configuration *Corps* : le corps entier impacte le véhicule.
- Configuration *Tête* : le joint supérieur du cou est désactivé. La tête seule impacte le véhicule.
- Configuration *Cou* : le joint inférieur du cou est désactivé. La tête liée au cou va impacter le véhicule
- Configuration *Thorax* : trois joints sont concernés : épaule droite et gauche et le joint reliant le thorax et l'abdomen. Le cou relié au thorax accompagne la tête lors de l'impact.

Les véhicules correspondant à la marque, modèle et année mis en cause dans chaque accident ont été obtenus pour le processus de reconstruction physique. Un programme digital a permis de relever les principales géométries du véhicule. Ces géométries ont servi de base pour la création de modèles sous Madymo, géométries définies par des plans, cylindres ou ellipsoïdes.

Les réponses mécaniques de la tête pour chaque simulation sont données en termes d'accélération linéaire et angulaire maximale mesurées au centre de gravité de la tête. Le critère de lésion de la tête, HIC a été calculé à partir des courbes temporelles d'accélérations linéaires.

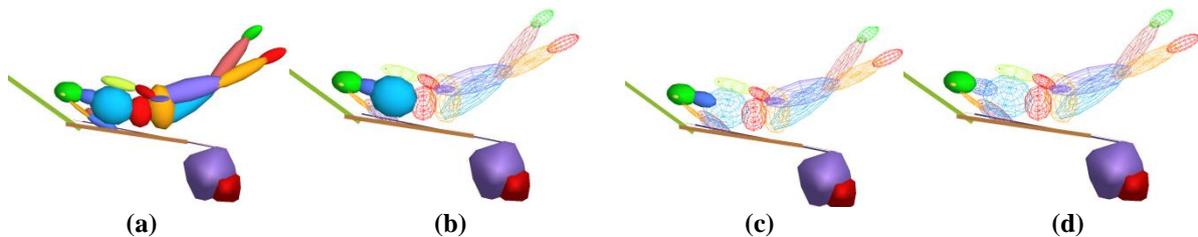


Figure 53 - Exemple des quatre configurations des conditions aux limites de la tête pour le piéton à 5 ms avant impact de la tête: (a) conf. corps, (b) conf. thorax, (c) conf. cou, (d) conf. tête.

Les propriétés de contact pour les interactions entre le piéton et les surfaces du véhicule, parechoc, grille, capot et pare-brise ont été déterminées par des tests sur véhicule pour chaque cas. Des simulations préliminaires sur Madymo ont défini des vitesses d'impact et énergies mises en jeu dans les différents contacts entre le corps du piéton et les surfaces impactées du véhicule. Les données ont été répliquées dans un laboratoire de tests avec des impacteurs EEVC WG17, impacteurs jambes cuisses, têtes ISO enfant et adulte.

1.3. Résultats et conclusions sur l'influence des conditions aux limites de la tête lors de reconstruction de traumatismes crâniens de piétons

Dans cette étude, l'influence des conditions aux limites de la tête sur la réponse de celle-ci a été évaluée lors d'impact de la tête. Pour huit cas d'accident réel piéton, quatre différentes conditions aux limites de la tête ont été simulées sous Madymo en multi-corps (tête seule, tête et cou, tête et thorax, corps entier). Ce travail a montré que les conditions aux limites de la tête influencent de manière significative la réponse de la tête à l'impact en termes de champ d'accélération, de HIC et de paramètres intracrâniens et donc influent sur l'estimation de prédictions de lésion de la tête. L'accélération linéaire varie jusqu'à 25% en fonction du chargement au niveau du cou. Le HIC et l'accélération angulaire varient à hauteur de 60% et 86% au maximum pour la configuration *tête* par rapport à celle du *corps*. Les valeurs d'accélération linéaire sont généralement surestimées quand la tête est considérée seule à l'impact. En ce qui concerne le comportement intracrânien de la tête, les résultats ont été comparés après simulation EF avec le modèle SUFEHM sous code Radioss. Il a été montré que la contrainte de Von Mises estimée après modélisation EF du cerveau est de même influencée par ces conditions aux limites à hauteur de 36%. Le dernier paramètre observé, la pression minimale du liquide cérébro-spinal, est le paramètre le moins influencé par les conditions aux limites de la tête

2. Etude sur la comparaison de deux modèles piétons multi corps (Modèles CASR et TNO)

2.1. Introduction

Depuis les années 1970, de nombreuses études ont montré que la forme avant et le type de véhicule ont un effet significatif sur la sévérité et les types de lésions du piéton en cas d'impact avec un véhicule (Ashton *et al.*1979,1983, Cavallero *et al.*1983, Schroeder *et al.*2000). Afin de reproduire numériquement au mieux les accidents, de nombreux modèles de piétons ont vu le jour (Garrett, 1996 *et* 1998, Yang *et al.*2000, TNO 2001, Hoof *et al.*2003, Coley *et al.*2001, Neale *et al.*2003). Ces modèles de piéton décrivent tous une cinématique plus ou moins précise. Nous allons dans cette partie étudier les différences qui peuvent exister entre deux modèles de piétons lors de la reconstruction de la cinématique d'un impact piéton. Trois cas d'accidents piéton ont été pris en compte dans cette étude, ils ont été reconstruits par le CASR (Centre for Automotive Safety Research d'Adélaïde - Australie) avec leur modèle de

piéton. Le modèle disponible pour la suite de nos études est le modèle piéton du TNO proposé dans le package Madymo. Cette étude consiste donc à comparer ces deux modèles de piéton sur les trois mêmes reconstructions d'accidents réels. La comparaison des modèles se fait en termes de modélisation du piéton, de cinématique globale du piéton lors de l'impact, de WAD et de distance de projection et en termes de réponse de la tête à l'impact.

2.2. Description des modèles piétons

Modèle piéton CASR :

Le modèle multi-corps du CASR utilisé pour cette étude a été développé dans le but de simuler des piétons lors de collisions véhicule/piéton. Le modèle original a été développé il y a une dizaine d'années (Garrett, 1996, Garrett, 1998) et a été amélioré et utilisé pour des simulations d'accident (Anderson *et al.*, 2005). Ce modèle consiste en 17 segments rigides liés par des joints cinématiques. Les propriétés des joints et raideurs des surfaces définissant le modèle sont basées sur les travaux réalisés par Ishikawa *et al.* (1993), Wismans (1995) et Mertz *et Patrick* (1971). Certains joints ont été ajoutés, d'autres modifiés (Garrett, 1996).

Ce modèle a été validé sur le comportement cinématique de plusieurs reconstructions physiques sur cadavre, réalisés par Ishikawa en 1993 au sein de l'institut JARI (Japan Automobile Research Institute), notamment sur des trajectoires de segments.

Modèle piéton TNO :

Le modèle piéton du TNO (Figure 54b) fait partie de la gamme de modèles Humain proposé par le logiciel Madymo (TNO, 2001). Le modèle piéton de base est celui d'un 50 percentile adulte mâle, dont l'anthropométrie provient de la base de données RAMSIS (1997). Ces données sont issues d'une population d'Europe de l'Ouest de 1984 âgée de 18 à 70 ans. La mise à l'échelle du modèle piéton a été réalisée avec le module MADYMO/SCALER (Happee *et al.*, 1998). Les caractéristiques de contact des différentes parties du corps sont basées sur la littérature et optimisées à partir de tests d'impacteurs réalisés sur cadavres (Meyer *et al.* 1994, Talantikite *et al.* 1998, Viano *et al.* 1989, Bouquet *et al.* 1994, Viano *et al.* 1989, Kajzer *et al.* 1990, Yang *et al.* 1995). De plus, trois séries de tests d'impact piéton/véhicule sur cadavres ont été simulées afin de valider la biofidélité de ce modèle piéton (Ishikawa *et al.*, 1993, Yang *et al.*, 2000, Hoof *et al.*, 2003).



Figure 54 - Modèles piéton sous Madymo a. modèle CASR, b. modèle TNO

2.3. Synthèse et résultats de l'étude

Trois cas d'accidents ont été reconstruits par le CASR à l'aide de leur modèle piéton et leur modèle de véhicule. Le but de cette première étude est de comparer les résultats obtenus en utilisant un autre modèle piéton disponible, le modèle piéton du TNO. Ces comparaisons se font sur les trois cas d'accidents (P034, P037 et P038) avec les conditions initiales implémentées par le CASR (raideurs, position initiale du piéton). Les comparaisons se font sur la cinématique du piéton jusqu'à l'impact, la vitesse de la tête à l'impact, l'accélération de la tête à l'impact et le HIC, ainsi que le WAD et la distance de projection du piéton.

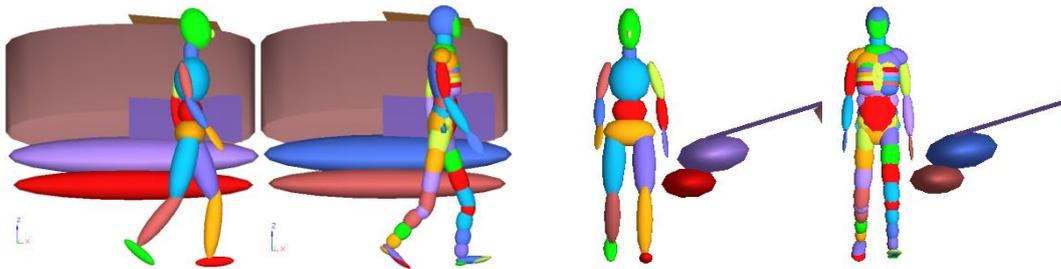


Figure 55 - Positions initiale et finale des piétons CASR et TNO pour le cas P034.

La Figure représente la position initiale des piétons CASR et TNO pour un des cas d'accidents. Les mêmes positions initiales des piétons par rapport au véhicule sont respectées. La Figure 56 - représente les trajectoires du centre de gravité de la tête et du pelvis lors de la simulation des trois cas d'accidents P034, P037 et P038 respectivement jusqu'au moment de l'impact.

Une différence est observée entre les deux modèles au niveau des genoux, du bassin et du centre de gravité de la tête (Figure). Le genou du modèle piéton TNO va heurter le parechoc plus bas que le modèle piéton CASR. Le bassin du TNO se retrouve plus haut et va donc impacter le capot plus haut que le modèle CASR. Malgré ces différences, les trajectoires du bassin et de la tête restent équivalentes jusqu'à l'impact (Figure 56 -). Après l'impact, ces différences sont beaucoup plus visibles sur la cinématique du piéton.

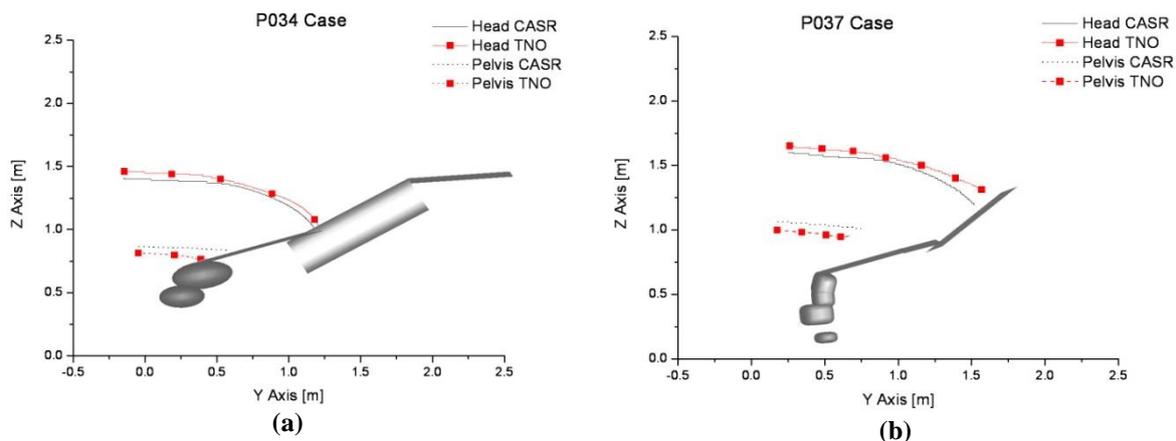


Figure 56 - Trajectoires du centre de gravité de la tête et du pelvis pour les simulations des trois cas d'accidents, avant l'impact, a. P034, b. P037.

La Figure 27 représente la trajectoire du centre de gravité de la tête pendant toute la cinématique du piéton, pour les deux cas d'accidents P034 et P037. Une différence de trajectoire est observée après l'impact de la tête. Cette différence s'explique notamment par la différence de modélisation des deux piétons (formes des ellipsoïdes et inerties, largeur du modèle). Le bassin du CASR est modélisé beaucoup plus large que celui du TNO, ce qui va influencer sur la cinématique du corps après impact.

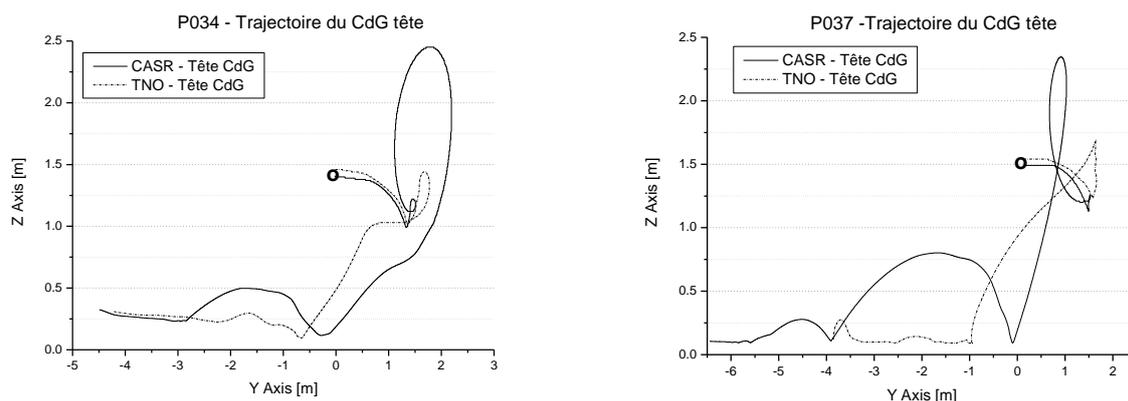


Figure 27 - Trajectoire du centre de gravité de la tête pour les simulations des cas d'accidents, P034 et P037

Le Tableau 6 récapitule les différents résultats obtenus après simulation numérique des trois cas d'accidents P034, P037 et P038 avec le modèle piéton CASR et le modèle piéton TNO. Les résultats sont comparés sur la taille et le poids des modèles piéton utilisés, la vitesse relative de la tête à l'impact, l'accélération résultante maximale du centre de gravité de la tête lors de l'impact piéton/véhicule, le HIC, le WAD de l'impact tête (Wrap Around Distance), ainsi que la distance de projection du piéton après impact. Les différences de résultats entre les modèles sont plus marquées pour le cas P037. Pour ce cas, l'orientation du corps à l'impact étant plus frontale, les différences de contours externes (ellipsoïdes) des modèles influent de manière plus marquée sur les résultats. Le modèle TNO pivote plus sur lui-même, ce qui peut expliquer la différence de vitesse de la tête à l'impact avec le modèle CASR. La Figure représente les courbes temporelles de l'accélération du centre de gravité de la tête pour les simulations avec le modèle CASR et le modèle TNO pour les trois cas d'accident P034, P037 et P038 respectivement. Les accélérations du centre de gravité à l'impact restent comparables selon les modèles de piéton. La seule grande différence est observée dans le cas P037 au niveau du pic d'accélération en raison d'une différence de vitesse de la tête à l'impact, 12.6 m/s pour le modèle CASR et 8.6 m/s pour le modèle TNO. Cette différence peut s'expliquer par une rotation du corps du modèle TNO jusqu'à l'impact de la tête, modifiant ainsi l'orientation de la tête à l'impact.

Tableau 6 - Récapitulatif des résultats des différentes simulations comparant les modèles piétons CASR et TNO sur les trois cas d'accident.

Simu.	Modèle piéton	Taille	Poids	Vitesse rel. tête	Acc max tête	HIC	WAD	Dist. projection
	units	cm	Kg	m/s	g	-	mm	m
P034	CASR	155	44	16,74	331	3773	1825	L-26,5
	TNO	155	44,5	17,29	248	3538	1835	L-26
P037	CASR	159	58	12,66	156	1570	2037	14
	TNO	159	58,2	8,59	101	311	2052	L-10,5
P038	CASR	163	65	5,43	105	324	1810	5,5
	TNO	163	65,1	7,22	103	273	1940	5

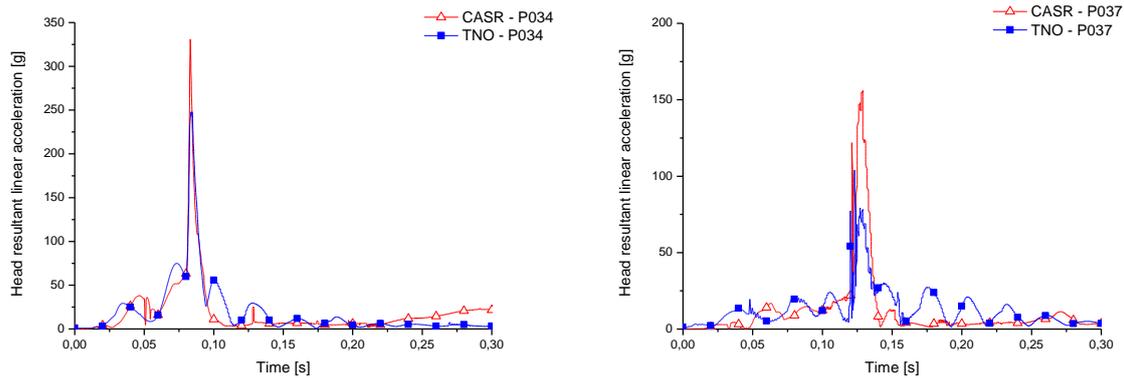


Figure 58. Courbes temporelles d'accélération linéaire résultante du centre de gravité de la tête pour les trois cas P034 et P037.

Une comparaison des deux modèles CASR et TNO a été réalisée sur trois cas d'accidents reconstruits. Les mêmes conditions initiales et mêmes modèles de véhicules ont été utilisés. Les résultats superposés sont la cinématique du piéton avant et après impact, la vitesse de la tête à l'impact ainsi que l'accélération du centre de gravité de la tête à l'impact et le WAD. Les principales différences morphologiques des deux modèles se situent au niveau du bassin et des genoux. Le modèle TNO présente un modèle de jambe plus détaillée, des genoux plus bas et un bassin plus haut et moins large que le modèle CASR. Le centre de gravité de la tête du modèle CASR se situe également plus bas que celui du modèle TNO. La différence de modélisation des piétons influe naturellement sur la trajectoire du piéton et influe, plus particulièrement pour le cas P037, sur la vitesse de la tête à l'impact et donc sur le pic d'accélération de la tête et le HIC.

3. Effects of pedestrian gait, vehicle front geometry and impact velocity on kinematics of adult and child pedestrian head

3.1. Introduction

The objective here is to investigate the effects of pedestrian gait, vehicle front geometry and impact velocity on the dynamic responses of the head. The multi-body dynamic (MBD) models were used to simulate the head responses in vehicle to pedestrian collisions with different vehicle types in terms of head impact point measured with Wrap Around Distance (WAD), head relative velocity and impact angle.

3.2. Parametric study definition

The multi-body dynamic (MBD) models were used to simulate responses of vehicle to pedestrian collisions with different vehicle types in terms of head impact point (Wrap Around Distance: WAD), head relative velocity and impact angle. Furthermore, the distribution of the head contact point on the vehicle fronts is analyzed for comparison with current testing areas used in the EEVC impactor procedures.

In order to simulate a large range of impact conditions, a simulation matrix is established using five vehicle types, two mathematical models of the pedestrians, seven pedestrian gaits defined based on walking postures in typical pedestrian accidents, as well as four impact speeds are considered for each pedestrian position and vehicle type.

Adult and 6YO Child pedestrian models

The human pedestrian models (PM) used in this study and illustrated in fFigure 59 are developed by TNO in the MADYMO environment. As shown, the 50th percentile male model and 6-year-old child model are employed in this study. The global anthropometry specifications are given in **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** [TNO 2006].

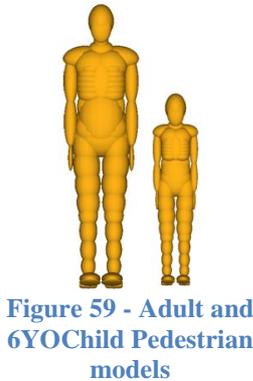


Tableau 7 - Pedestrian model size on simulation

Pedestrian parameter	6 years old child	50th male
Standing height (m)	1.17	1.74
Seated height (m)	0.64	0.92
Shoulder width (m)	0.28	0.47
Knee height (m)	0.35	0.54
Mass (kg)	23.0	75.7
Height of pedestrian center of gravity (m)	0.68	0.97
Height of head center of gravity (m)	1.11	1.65

Vehicle models

The vehicle models are selected based on the vehicle geometry corridors within APROSYS SP3 project [Kong et al. 2010]. As shown in Figure and 61, five vehicle geometry corridors are constructed according to the shapes and sizes of the main existing vehicles in Europe. In this study, five vehicles including Super Mini Car (SMC), Small Family Car (SFC), Large Family Car (LFC), Multi Purpose Vehicle (MPV) and Sport Utility Vehicle (SUV) are selected based on the vehicle geometry corridors. Vehicle front model consists of bumper, hood edge, hood top, windscreen and four wheels ellipsoids to approximate the exterior profile of a vehicle. The contact stiffness's of vehicle front components are obtained according to Martinez et al.'s work [Martinez et al. 2007].

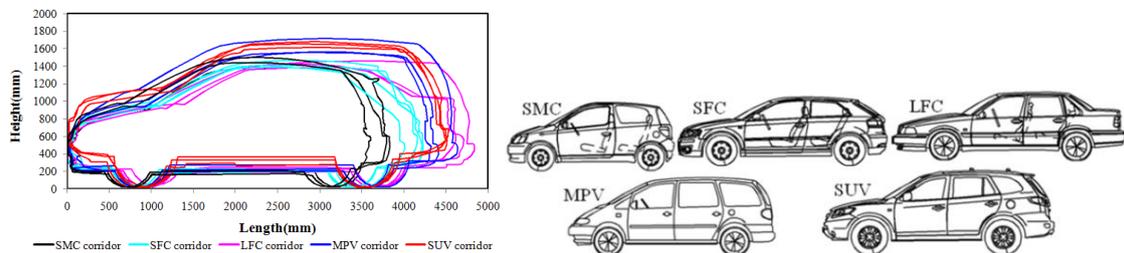


Figure 60 - Different vehicle types and Vehicle geometry corridors

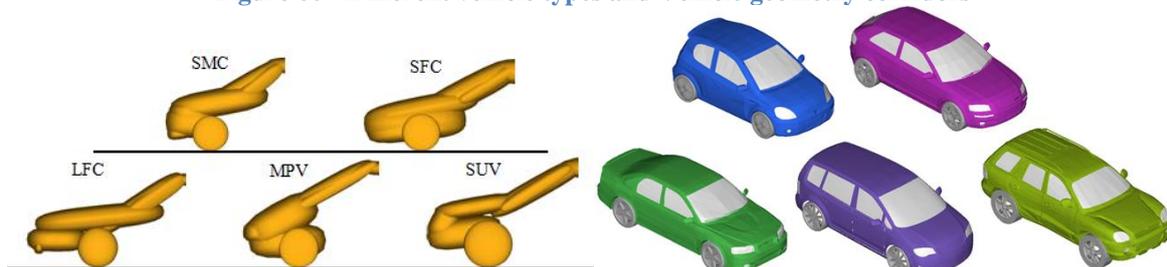


Figure 61 - Illustration of the five vehicles developed under MADYMO software.

Setup of configurations and simulation matrix

The configurations for simulations of vehicle-to-pedestrian collisions are developed using four different impact speeds of 30, 40, 50 and 60 km/h. Seven pedestrian gaits (0%, 20%, 40%, 60%, 80%, front and rear) are used in the simulations for each child and adult pedestrian models as shown in figure 62. The stances of the pedestrian model are obtained using functions of joint angles and H-point according to literature [Untaroiu et al. 2009]. The

pedestrian hitting position is selected at the vehicle central line of the model in all of simulations. The friction coefficients are 0.6 for foot/ground and wheels/ground, and 0.5 for the contacts between body segments and vehicle front structures [Liu *et al.* 2002].

A parametric study is conducted using 4 variables to understand the influence of pedestrian size and gait, vehicle front geometry and vehicle impact speed. Simulation outputs concern pedestrian impact condition such as head impact velocity, head impact angle, and head impact location (Wrap Around Distance: WAD). A simulation matrix was designed with a total of 280 simulations.

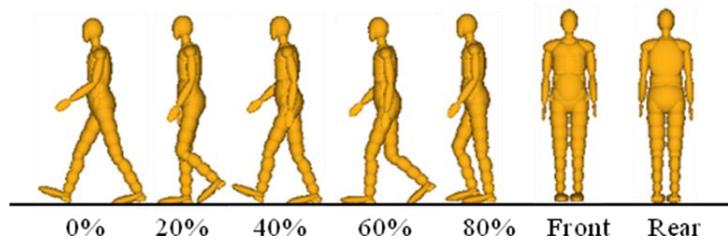


Figure 62. Pedestrian stances for different gait parameters (%)

3.3. Results

3.3.1 Wrap Around Distance (WAD)

A pedestrian hit by a car is wrapped around the front of the vehicle. Therefore, head impact location is estimated by the WAD, which is the length measured along the vehicle's front profile from the ground to the head impact location. The WAD values for five vehicle types are compared at different pedestrian gait and impact velocity in Figure . For the adult pedestrian, the WAD values exceed 2.1 m after collision velocity of 40 km/h for the SFC and LFC, while the WAD values are closer to 1.8m for the SMC, MPV and SUV. However, the effect of vehicle velocity on the WAD is not significant after collision velocity of 40 km/h. In the case of the child, the WAD values are below 1.35 m except the LFC, and there is a slight increase with increase in vehicle velocity. It can be seen in figure 56 that the effects of pedestrian gait on WAD are larger for the adult than for the child, and that the WAD are larger for the SFC and the LFC than other vehicle types in the adult simulations.

The results show that at a vehicle impact velocity 40 km/h, the mean values of WAD for the SMC, SFC, LFC, MPV and SUV are 1.78 m, 2.11 m, 2.14 m, 1.82 m and 1.74 m respectively. However, for the 6 year old child, the mean values of WAD for the SMC, SFC, LFC, MPV and SUV are 1.20 m, 1.16 m, 1.29 m, 1.14 m and 1.17 m respectively.

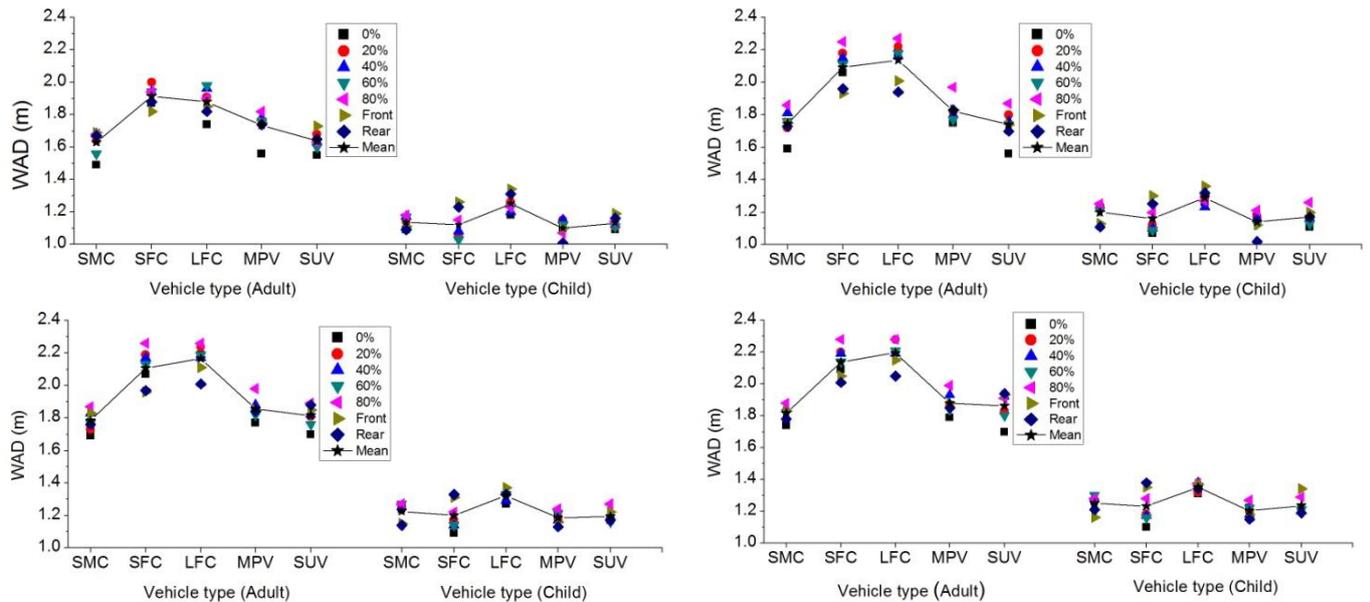


Figure 63. Comparison of the WAD value on different vehicle for different pedestrian gait and vehicle impact velocity (30km/h, 40km/h, 50km/h, 60km/h)

The WAD value is influenced by the front construction of the vehicle. The bumper center height, hood edge height, hood slope angle and hood length all have significant effects on the pedestrian kinematics.

For the adult, the WAD values are bigger for the SFC and the LFC than other vehicle types, and for the child, the WAD value is biggest for the LFC.

As shown in figure 64, for the SMC, the adult head impact points are distributed on the lower end of windscreen and the child head hits the middle of bonnet. Results from the simulations with the SFC show that the distribution of adult and child head impact points is on the middle of the windscreen and bonnet areas respectively.

In the case of the LFC, the adult head hits the bonnet rear area and the low windscreen, and the child head impact points are located on the bonnet middle area.

The results from simulations of the MPV, it can be found that the adult and child head are accepted to hit the low windscreen area and the bonnet front respectively.

For the SUV, the adult head hits the lower end of the windscreen and rear bonnet, while the child head impact points are concentrated on the bonnet front edge.

At a vehicle impact velocity of 40 km/h, for the SFC and the LFC, the adult head contact points are more rearward than the 2.1 m WAD position, while most of the pedestrian head impact points are closer to the 1.7 m WAD position for other vehicle types.

In the case of the child, most of head impact points are closer to the 1.2 m WAD position located on the bonnet front edge for the MPV and SUV and the bonnet middle area for the SMC, SFC and LFC.

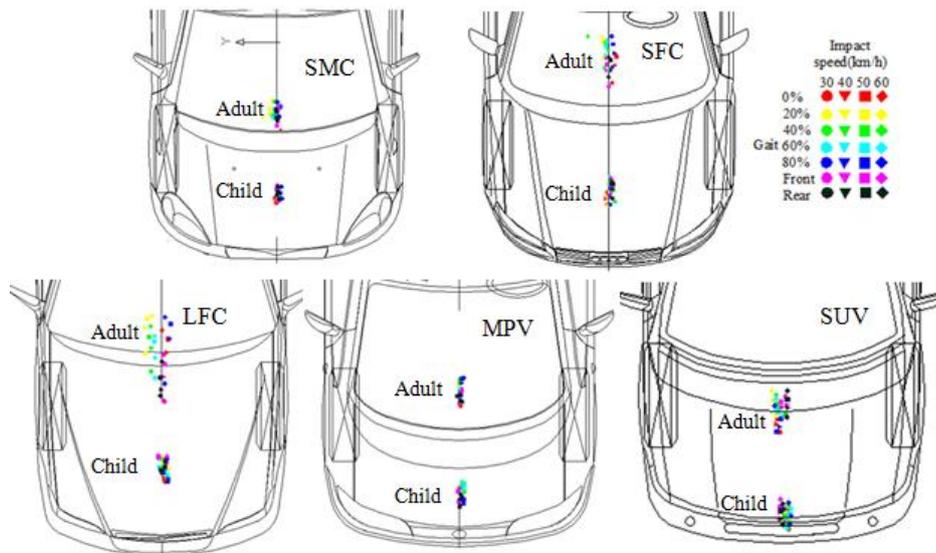


Figure 64 - Comparison of the distribution of head contact point on different vehicle for different vehicle velocity and pedestrian gait

Vehicle impact velocity and pedestrian gait also have critical effects on the WAD. The WAD gradually increases with the increase of vehicle travel velocity. The dynamic responses of the legs have a great influence for the adult pedestrian dynamic responses, but the growth trends are not remarkable at a collision velocity of 40 km/h and higher for the adult.

In the case of the child, at the time of impact, child's upper body came in contact with the vehicle, so the effect of vehicle front structure and child gait on the WAD is not remarkable.

3.3.2 Head impact velocity relative to the vehicle

The head relative impact velocities for five vehicle types and seven pedestrian gaits obtained at velocities of 30 km/h to 60 km/h for adult and child are plotted in Figure .

The head impact velocity is gradually increasing with the increase of vehicle travel velocity both for adult and child. It was found that the head impact velocity is higher for the adult impacted with all of the vehicles than for the child.

For the adult, the mean value of the head impact velocity is larger for the SFC and the LFC than for the other vehicles and the head impact velocity is below vehicle velocity in all cases except for the SFC, while the mean value of child head impact velocity is the smallest for the SUV, and the value is lower than the vehicle velocity and the adult head impact velocity.

It can be also observed that the effect of pedestrian gait on head impact velocity is larger for the adult than for the child.

When the vehicle travel velocity is set to 40 km/h, the mean value of head impact velocity of the 50th percentile adult is 36 km/h for SMC, 42 km/h for SFC, 40 km/h for LFC, 36 km/h for MPV and 37 km/h for SUV, while the child head impact velocity is 29 km/h for SMC, 35 km/h for SFC, 33 km/h for LFC, 31 km/h for MPV and 23 km/h for SUV.

The maximum value of adult head impact velocity for SMC, SFC, LFC, MPV and SUV is respectively 49 km/h, 50 km/h, 53 km/h, 47 km/h and 51 km/h.

For the 6 year old child, the maximum values of WAD for SMC, SFC, LFC, MPV and SUV is 34 km/h, 43 km/h, 36 km/h, 38 km/h and 42 km/h respectively.

The average impact velocity of the adult pedestrian head is below the vehicle velocity except in the case of the SFC, while the child head impact velocity is lower than the vehicle velocity and the adult head impact velocity.

When a vehicle impacts a pedestrian, the leg of the pedestrian first contacts with vehicle front end and then the pedestrian is rotated around the impact position. So, the different bumper

center height, bumper lead length and hood slope angles of various vehicle types lead to different kinematics of the pedestrians.

At a vehicle impact velocity 40 km/h, the head impact velocity for the SMC, MPV and SUV is about 36 km/h which is 10% lower than 40 km/h for adult, while the child head impact velocity is about 25% lower than the 40 km/h specified by EEVC.

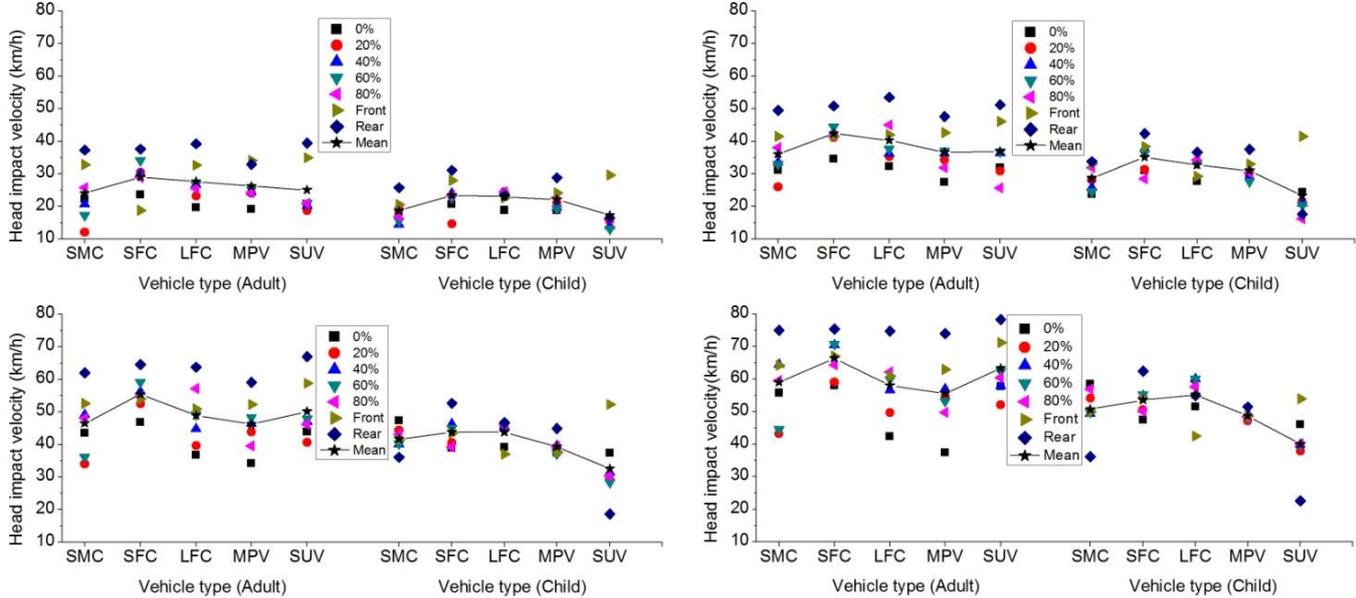


Figure 65 - Effects of pedestrian gait and vehicle type on head impact angle at different vehicle impact velocity(30km/h, 40km/h, 50km/h, 60km/h)

3.3.3 Head impact angle

The head impact angle refers to the angle between the direction of the head impact speed and the ground reference level in a downward and rearward direction. As shown in Figure , a comparison is made between the head impact angle for different pedestrian gaits, vehicle types and vehicle impact velocities.

Figure shows that a specific trend cannot be observed about the influence of vehicle types both for adult and child. However, in case of the child impact, the head impact angle is observed to be highly dependent on the geometry of the vehicle. It also can be found that the head impact angle is influenced by gait both for the adult and child and the fluctuation of head impact angle is about 10°.

When the vehicle travel velocity was set to 40 km/h, the mean value of adult head impact angle is 63 degrees for SMC, 55°for SFC, 66°for LFC, 55°for MPV and 63°for SUV, while the mean value of child head impact angle is 63°for SMC, 55°for SFC, 66°for LFC, 48°for MPV and 29°for SUV.

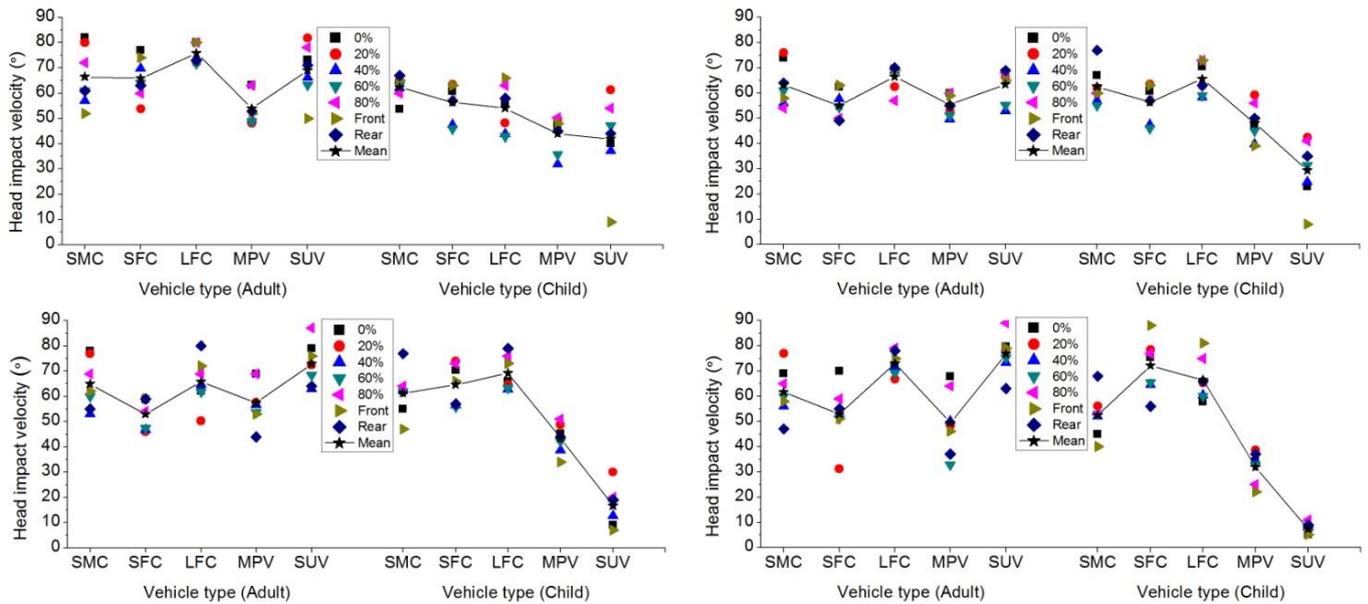


Figure 66 - Effects of pedestrian gait and vehicle type on head impact velocity at different vehicle impact velocity

The differences in head impact angle can be mainly attributed to the different vehicle front geometries and pedestrian gaits (Figure), which lead to different kinematics of the pedestrian after impact.

For the adult, the initial contacted position of the SFC and MPV is higher than other vehicle types, so the vertical component of the head impact velocity is lower and the impact angle is lower.

The child head impact angle is larger for the SMC, SFC and LFC than for the MPV and SUV, and it is the smallest for the SUV. For the SUV, the head impacted directly with the hood edge before there is big neck bending (figure 67), so the child head contact angle is the smallest. At a vehicle impact velocity 40 km/h, the average of head impact angles for the SFC and MPV are 55° which is 16% lower than the 65° specified by EEVC for an adult.

The average head impact angles for the SMC and LFC are 63° and 66° respectively which are about 28% higher than the 50° specified by EEVC for a child, while for the SUV, the head impact angle is 29° which is 42% lower than 50° specified by EEVC for a child.

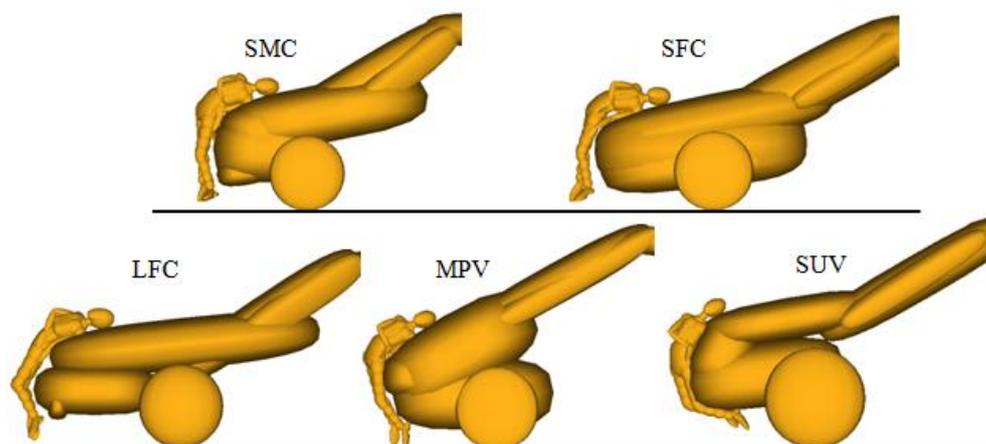


Figure 67 - Comparison of child pedestrian kinematics for different vehicle type (at 40km/h and 60% gait)

The kinematic of the pedestrian head is determined by the first contact between the vehicle and the pedestrian's legs. Therefore, the head impact orientation at the time of contact with vehicle is influenced by pedestrian gaits, which can be observed in Figure .

The head orientations at the time of impact simulated from different gaits are different which can result in different injuries. Due to change in gaits percentage the centre of gravity of the pedestrian changes, thus resulting in different stress points on pedestrian head, leading to different linear and angular accelerations.

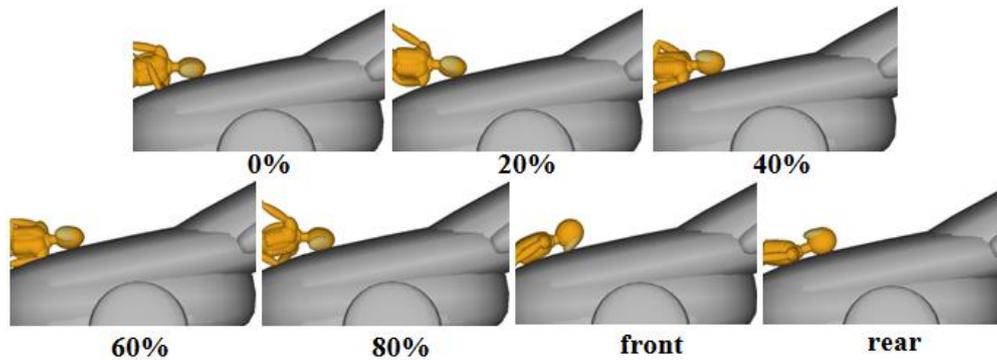


Figure 68 - Comparison of child pedestrian head impact orientation at time of contact with vehicle for different gaits (at 40km/h for SFC)

3.4. Conclusions

This study presents an extensive analysis of pedestrian head motion based on multi-body simulation and focusing on the head impact conditions at the time before impact. The results contribute to an in-deep understanding of the head impact conditions in regulation test procedures to the front of different passenger vehicles.

The WAD is influenced by the vehicle front geometry and pedestrian gait, especially for the adult pedestrian. The WAD gradually increases with the increase of vehicle travel velocity and the growth trends are not remarkable at a collision velocity of 40 km/h and higher both for the adult and child. For the SFC, LFC and MPV, the adult head impact points focus on the windscreen. The simulation results indicated that the adult headform impacts on the vehicle between 1700 mm and 2100 mm or more.

The head impact velocity is determined by vehicle front geometry, vehicle impact velocity and pedestrian gait. Most of the simulations the head impact velocities were lower than the initial vehicle velocities, especially for the child, the head impact velocity is about 25% lower than the vehicle velocity. The head impact velocity is higher for the SFC and LFC than for SMC, MPV and SUV. The study recommends that the subsystem test procedures should define different impact speeds for different vehicle types. Furthermore, the child headform impact speed should be lower than the adult headform impact speed.

The head impact angle depends on the vehicle front geometry and pedestrian gait. The head impact orientation at the time of contact with vehicle is mainly influenced by the pedestrian gait. For the adult, the angle for the SFC and MPV is lower than for the other vehicle types, while the child head contact angle is larger for the SMC, SFC and LFC than for the MPV and SUV, and it is the smallest for the SUV. The simulation results also suggest that the subsystem test procedures should define different impact test angles for different vehicle types. The head impact angles for the SFC and MPV should be lower than 65° specified by EEVC for an adult. The head impact angles for the SMC and LFC should be higher than 50° specified by EEVC for a child, while for SUV, the head impact angle should be lower than 50° specified by EEVC for a child.