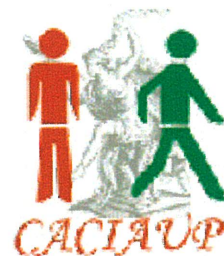


# Projet CACIAUP

Amélioration des **C**onnaissances sur les  
**AC**cidents **I**mpliquant un **AU**tomobiliste et  
un **P**iéton



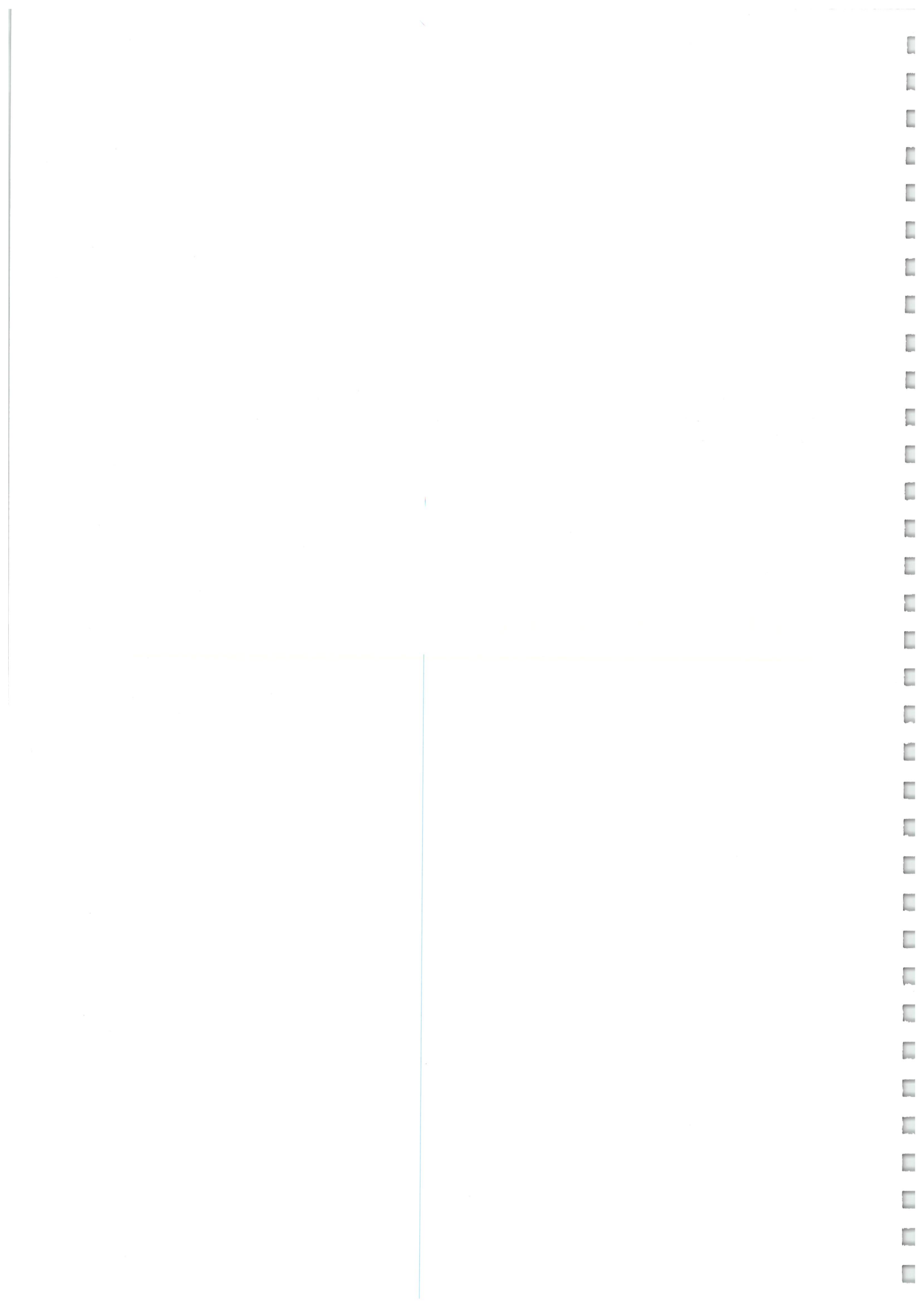
## Guide de la reconstruction

---

M<sup>r</sup> SINNAEVE Jérémy  
[jeremy.sinnaeve@ceesar-antennes.org](mailto:jeremy.sinnaeve@ceesar-antennes.org)

Paris, le 17 décembre 2009







# Remerciement

Je tiens à remercier particulièrement Monsieur Jean-Philippe DEPRIESTER, Commandant à l'Institut de Recherche Criminelle de la Gendarmerie Nationale (IRCGN) pour l'aide compétente qu'il m'a apportée et pour m'avoir fait profiter de ses connaissances sur la reconstruction des accidents véhicule contre piéton.







# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction et objectif</b>	<b>7</b>
1.1	Introduction . . . . .	7
1.2	Objectif du document . . . . .	8
1.3	Organisation du document . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Décomposition du mouvement du piéton lors d'une collision frontale avec un véhicule léger</b>	<b>9</b>
2.1	La phase de contact . . . . .	10
2.2	La phase de projection . . . . .	10
2.3	La phase de glissement . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Définitions</b>	<b>12</b>
3.1	Distance longitudinale de projection . . . . .	12
3.2	Distance transversale de projection . . . . .	12
3.3	Largeur quantitative du choc . . . . .	12
3.4	Distance développée : WAD (Wrap Around Distance) . . . . .	13
3.5	Distance entre l'impact tête et l'avant du pare-choc . . . . .	13
3.6	Piéton . . . . .	14
3.7	Caractéristiques de la géométrie avant des voitures . . . . .	14
3.8	Classification des véhicules en fonction de la géométrie avant . . . . .	15
3.8.1	Classification ancienne . . . . .	15
3.8.2	Classification plus récente donnée par le DEKRA . . . . .	16
3.9	Trajectoire cinématique du piéton . . . . .	18
3.9.1	Trajectoire enroulée (WRAP trajectory) . . . . .	18
3.9.2	Projection vers l'avant (Forward projection) . . . . .	19
3.9.3	Projection de côté (Fender vault) . . . . .	20
3.9.4	Projection au dessus du toit (Roof vault) . . . . .	21
3.9.5	Trajectoire enroulée avec "saut-périlleux" (Somersault) . . . . .	21
<b>4</b>	<b>Facteurs ayant une influence sur la trajectoire du piéton</b>	<b>23</b>
4.1	Facteurs majeurs . . . . .	23
4.1.1	Vitesse d'impact du véhicule . . . . .	23
4.1.2	Vitesse de déplacement du piéton au moment de l'impact . . . . .	23
4.1.3	Forme avant des véhicules . . . . .	25
4.1.4	Taille du piéton . . . . .	25
4.1.5	Décélération du véhicule . . . . .	25
4.2	Facteurs mineurs . . . . .	25







4.2.1	Positions des membres inférieurs du piéton lors de l'impact . . . . .	25
4.2.2	Chaussée humide . . . . .	25
<b>5</b>	<b>Configurations spéciales de collision</b>	<b>26</b>
5.1	Collision piéton sur le coin avant gauche ou droit de la voiture . . . . .	26
5.2	Impact sur le côté . . . . .	27
5.3	Impact ventral ou dorsal du piéton . . . . .	28
5.3.1	Impact ventral . . . . .	28
5.3.2	Impact dorsal . . . . .	28
5.4	Phénomène de franchissement . . . . .	29
<b>6</b>	<b>Localisation du point d'impact</b>	<b>30</b>
6.1	Marque de chaussures . . . . .	30
6.2	Trace de freinage élargie à proximité du point d'impact . . . . .	31
6.3	Débris . . . . .	34
6.4	Analyse graphique de la localisation du point d'impact . . . . .	35
<b>7</b>	<b>Caractéristiques biométriques des piétons impactés</b>	<b>37</b>
7.1	Poids et Taille des adultes . . . . .	37
7.2	Poids et Taille des enfants . . . . .	38
7.3	Hauteur du centre de gravité du corps . . . . .	40
<b>8</b>	<b>Vitesse du piéton</b>	<b>41</b>
<b>9</b>	<b>Méthodes de détermination des vitesses</b>	<b>44</b>
9.1	Méthodes utilisant la conservation de la quantité de mouvement . . . . .	44
9.1.1	Utilisation de la conservation de la quantité de mouvement . . . . .	44
9.2	Utilisation de modélisations analytiques simples . . . . .	48
9.2.1	Modélisation de la trajectoire post-impact du piéton, similaire à celle d'un projectile . . . . .	48
9.2.2	Modélisation simple dite "Fall and Slide" de Collins . . . . .	52
9.2.3	Modélisation simple dite "Fall, bouncing and Sliding" de Searle and Searle (1983) . . . . .	53
9.2.4	Modélisation simple dite "Fall, bouncing and Sliding" de Searle (1993) . . . . .	54
9.2.5	Détermination de la vitesse d'impact via l'Efficacité de projection . . . . .	55
9.2.6	Coefficient de friction du piéton au sol . . . . .	57
9.3	Modélisations empiriques . . . . .	58
9.3.1	APPEL (1975) . . . . .	58
9.3.2	STCHERBATCHEFF (1975) . . . . .	59
9.3.3	KÜHNEL (1976) . . . . .	59
9.3.4	STURZ (1976) . . . . .	59
9.3.5	WOOD (2000) . . . . .	60
9.3.6	FUGGER (2000) . . . . .	60
9.3.7	TOOR (2002) . . . . .	60
9.3.8	TOOR (2003) . . . . .	61
9.3.9	SIMMS (2004) . . . . .	62
9.4	Validation via la modélisation multicorps avec PC CRASH . . . . .	63





9.4.1	Validation du module piéton multicorps de PC CRASH . . . . .	64
9.4.2	Description du modèle . . . . .	64
9.4.3	Propriétés de chaque élément . . . . .	64
9.4.4	Géométrie du véhicule . . . . .	66
9.4.5	Fonctionnement du modèle . . . . .	66
9.4.6	Manipulation du logiciel . . . . .	67
<b>10</b>	<b>Application de la méthodologie à un cas concret</b>	<b>68</b>
10.1	Accident 01013 . . . . .	68
10.1.1	Méthode simple : . . . . .	69
10.1.2	Modélisation type “Fall and Slide” de Collins . . . . .	73
10.1.3	Modélisation simple dite “Fall, bouncing and Sliding” de Searle and Searle . . . . .	74
10.1.4	Modélisation simple dite “Fall, bouncing and Sliding” de Searle . . . . .	74
10.1.5	Modélisations empiriques . . . . .	75
10.1.6	Modélisation multi corps avec PC CRASH . . . . .	75
10.2	Synthèses . . . . .	77
	<b>Bibliographie</b>	<b>79</b>





# Préambule

Le projet **CACIAUP** - amélioration des **C**onnaissances sur les **AC**cidents **I**mpliquant un **AU**tomobiliste et un **Pi**éton est un projet français financé par la Fondation Sécurité Routière (FSR) et Laboratoire d' Accidentologie et de Biomécanique (LAB). Il a débuté en juin 2009 et se terminera en juin 2012 (soit 36 mois après le lancement).

L'objectif principal du projet CACIAUP est **d'améliorer les connaissances sur les causes d'accidents impliquant au moins un piéton.**





# Chapitre 1

## Introduction et objectif

### 1.1 Introduction

Généralement, les accidents impliquant un véhicule contre un piéton engendrent dans un très grand nombre de cas, des blessures sévères pour l'utilisateur vulnérable. De nombreux facteurs influent sur le risque potentiel de blessures du piéton dans ces collisions mais le facteur prépondérant reste la vitesse d'impact de la voiture. De ce fait, dans les investigations menées sur ce type d'accident, la détermination de cette vitesse est fondamentale aussi bien pour les ingénieurs en automobile afin de réduire l'agressivité du véhicule (design avant) que pour les biomécaniciens dans la survenue des blessures. Également, la reconstruction va permettre d'avoir des informations cinématiques importantes eu égard à la pré collision (manœuvre, défaillance, réaction, *etc...*) et notamment la détermination de la vitesse initiale<sup>1</sup>, l'ensemble permettant par la suite l'étude des possibilités d'évitement d'accident. La dynamique, les méthodologies et principes utilisés dans ces accidents sont très différents de ceux utilisés usuellement pour reconstruire les collisions entre véhicules. La méthode fréquemment utilisée pour déterminer cette vitesse est basée sur le témoignage des impliqués et sur des données factuelles telles que les traces de gommes de pneumatiques laissées par le véhicule, la localisation des déformations présentes sur le véhicule ou encore la distance de projection du piéton. Cependant, la multiplication des systèmes de freinage pourvus d'ABS<sup>2</sup> obligatoires sur les véhicules depuis 2004 limite les possibilités pour l'accidentologue ; dont un des desseins est de calculer la vitesse d'impact du véhicule. De part l'absence de traces de freinage visibles à l'œil nu, l'utilisation de méthodes alternatives basées sur la distance de projection du piéton s'avère être d'un recours précieux dans la détermination de vitesse d'impact du véhicule dans les cas de freinage avec ABS.

Ce document présente différents types de modélisations analytiques de reconstruction simples les plus courantes basées sur les lois de la mécanique du point pesant, certaines modélisations empiriques ainsi que le modèle multicorps inclus dans le logiciel de simulation PC CRASH<sup>3</sup>. Au préalable, nous décrirons dans le document la méthodologie de recueil ainsi

---

1. Vitesse du véhicule en général lors de l'événement initiateur qui annonce le dysfonctionnement du système **HVE** {Homme, Véhicule, Environnement}; la genèse de l'accident survient de manière générale à ce moment là.

2. Anti-lock Braking System

3. PC CRASH est un logiciel de simulation numérique autrichien spécialisé dans les accidents routiers.



que l'ensemble des paramètres importants, leurs possibilités et limites.

## 1.2 Objectif du document

L'objectif de ce document est de fournir aux investigateurs de l'équipe d'accidentologues travaillant sur le projet CACIAUP une méthodologie commune de reconstruction des accidents voiture contre piéton.

Le but d'une telle démarche doit permettre de garantir la cohérence des paramètres cinématiques ou dynamiques des reconstructions ou simulations des cas d'accident traités par une méthodologie scientifique rigoureuse et commune, ces données étant ensuite stockées dans la base propre au projet.

## 1.3 Organisation du document

Nous donnerons au préalable les définitions (chapitre 3) essentielles à la compréhension et l'analyse des accidents impliquant une voiture particulière et un piéton où la trajectoire de ce dernier sera décomposée en trois phases pour un choc frontal (chapitre 2) ; les configurations spéciales de collision seront données ensuite au chapitre 5. Par ailleurs, du fait de la complexité de ces accidents, nous listerons les facteurs ayant une influence majeure sur la trajectoire post impact du piéton (chapitre 4). Dans les reconstructions, étant donné que la localisation du point d'impact est fondamental, nous donnerons des éléments utiles à sa détermination (chapitre 6). Par ailleurs, les caractéristiques biométriques du piéton seront abordées (chapitre 7) ainsi que sa vitesse de déplacement (chapitre 8). Enfin, nous donnerons diverses méthodes de déterminations des vitesses (chapitre 9) que nous illustrerons à la fin du document par un exemple (chapitre 10).

---

Le programme a été créé dans les années 1990 par Hermann Steffan et Andreas Moser et est utilisé dans le monde entier aussi bien par les experts que les chercheurs.





## Chapitre 2

# Décomposition du mouvement du piéton lors d'une collision frontale avec un véhicule léger

Dans la plus grande majorité des accidents impliquant un véhicule léger et un piéton, l'utilisateur vulnérable est percuté sur la chaussée de la route par l'avant du véhicule. La trajectoire subie par le piéton dépend de nombreux facteurs et demeure particulièrement complexe. Afin de mieux visualiser cette complexité, il convient d'appréhender celle-ci par un découpage séquentiel simple et schématique. En l'occurrence, la trajectoire peut se décomposer en trois phases distinctes :

- la phase de contact,
- la phase de projection,
- la phase de glissement.

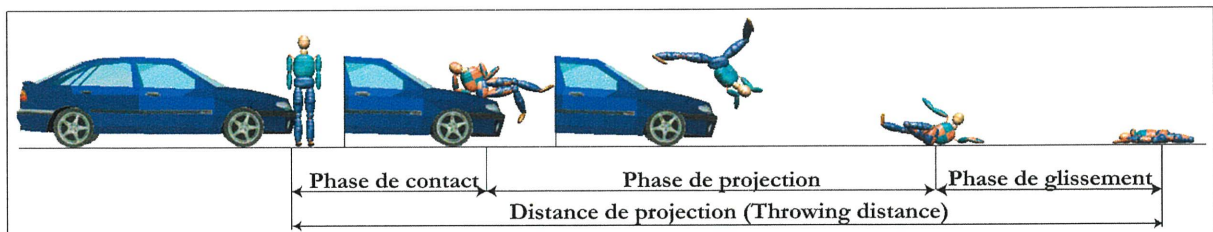


FIGURE 1 – Vue schématique et de côté d'une collision entre une voiture et un piéton.

Nous nous limiterons ici au cas le plus représentatif *i.e.* un choc frontal (80 % ces cas) d'une voiture avec un piéton. (*confer* FIG. 2 page 10)



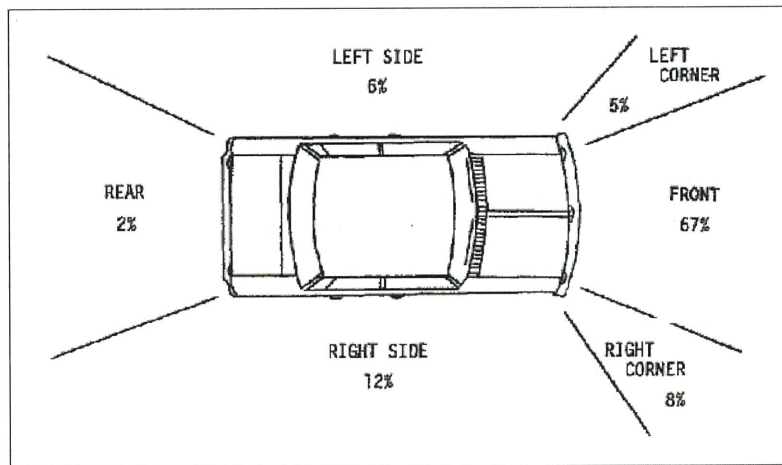


FIGURE 2 – Localisation des chocs piéton-véhicule selon [24]

## 2.1 La phase de contact

Couramment, le premier contact entre le véhicule et le piéton se situe au niveau des membres inférieurs pour le piéton et du pare-choc avant pour le véhicule. Les forces de contact ont pour effet de générer un double mouvement de translation et de rotation, ce dernier mouvement étant fonction du bras de levier *i.e.* la distance entre le point d'appui et le centre de gravité (CG) du piéton. En effet, plus la distance entre le point d'appui (point de contact) et le CG du piéton est grande, plus la vitesse de rotation du corps sera élevée. Du fait de la rotation du corps autour du pare choc du véhicule, le thorax et la tête peuvent percuter différents éléments de la voiture :

- soit le capot,
- soit la partie inférieure du pare prise,
- soit le pare-prise,
- soit le pavillon,
- ou encore le pied A<sup>1</sup>.

Cette phase de collision est appelée “**impact primaire**”. Notons que durant le temps de l'impact, la quantité de mouvement du véhicule est transférée au piéton. Cette phase se termine lorsque le piéton et le véhicule sont séparés.

## 2.2 La phase de projection

A la fin de la phase de contact, si le véhicule freine, le piéton se désolidarise du véhicule et est projeté dans les airs à une vitesse proche de celui-ci : le corps du piéton est alors assi-

1. Il s'agit du montant de pare-brise.





milable à un projectile. En revanche, si le véhicule est non décéléré avec une vitesse élevée, il est possible, dans ce cas, que le corps du piéton passe au-dessus du véhicule immédiatement après la phase de contact et s'immobilise derrière celui-ci. A la fin de la phase de projection, le piéton percute le sol : ce second heurt est appelé "**impact secondaire**". Notons que lorsque le piéton heurte un obstacle après l'impact secondaire, celui-ci sera référencé comme l'"**impact tertiaire**".

**Nota Bene** : Lorsque le piéton percute un obstacle durant la phase de projection, cet impact sera alors assimilé à l'impact secondaire et le choc au sol qui suit référencé comme étant l'impact tertiaire.

## 2.3 La phase de glissement

Cette phase décrit le mouvement du corps du piéton depuis le premier contact du piéton au sol (*i.e.* impact secondaire) jusqu'à son immobilisation au sol.

Notons que ce découpage séquentiel reste assez simpliste. Nous verrons par la suite que d'autres modélisations plus élaborées de la trajectoire du piéton existent.



# Chapitre 3

## Définitions

Afin de faciliter la compréhension du document, ce chapitre présente les termes les plus couramment utilisés dans les accidents impliquant une voiture contre un piéton..

### 3.1 Distance longitudinale de projection

Il s'agit de la distance entre le point de choc et la position finale du piéton dans le sens de déplacement du véhicule. Cette distance comprend la distance parcourue par le piéton durant la phase de vol et celle parcourue durant la phase de projection (longitudinal throwing distance)(*confer* FIG. 3 page 13).

### 3.2 Distance transversale de projection

La distance séparant le point de choc et la position finale du piéton perpendiculairement à la direction de déplacement du véhicule est appelée distance transversale de projection (transverse throwing distance)(*confer* FIG. 3 page 13).

### 3.3 Largeur quantitative du choc

Lors d'une collision entre une voiture et un piéton, le pare-choc entre dans un premier temps en contact avec les jambes du piéton, le bassin venant en contact avec la partie inférieure du capot. Ensuite, la tête ou l'épaule percute le véhicule lorsque le piéton bascule totalement. Du fait de la vitesse de déplacement du piéton et de la rotation induite par le choc, il en résulte un décalage entre le premier et le second contact du corps sur la voiture. Cette distance (décalage) est appelée largeur quantitative du choc (damage offset)(*confer* FIG. 3 page 13).



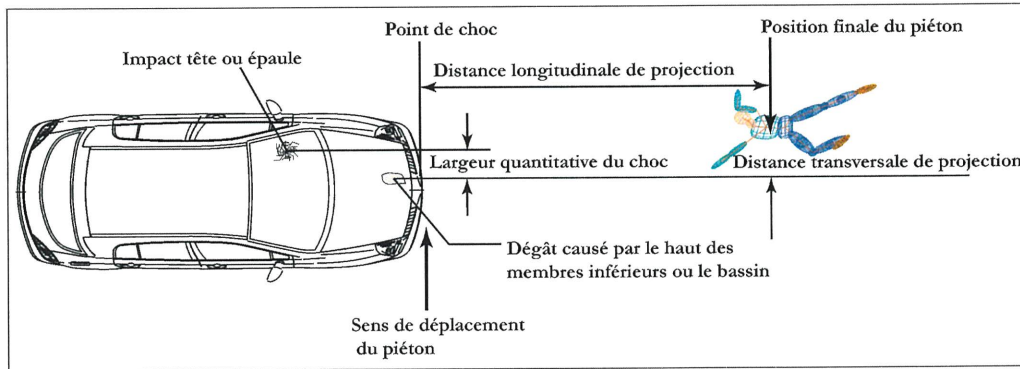


FIGURE 3 – Définitions.

### 3.4 Distance développée : WAD (Wrap Around Distance)

Selon la norme ISO 12353 [23], il s'agit de la distance la plus courte en profil entre le sol et le point d'impact tête sur le véhicule, mesurée sur la structure avant du véhicule (*confer* FIG. 4 page 13).

### 3.5 Distance entre l'impact tête et l'avant du pare-choc

Distance prise de façon horizontale entre l'impact tête relevée sur la voiture et l'avant du pare-choc (voir  $D_{(\text{impact tête - pare choc avant})}$  sur la FIG. 4 page 13).

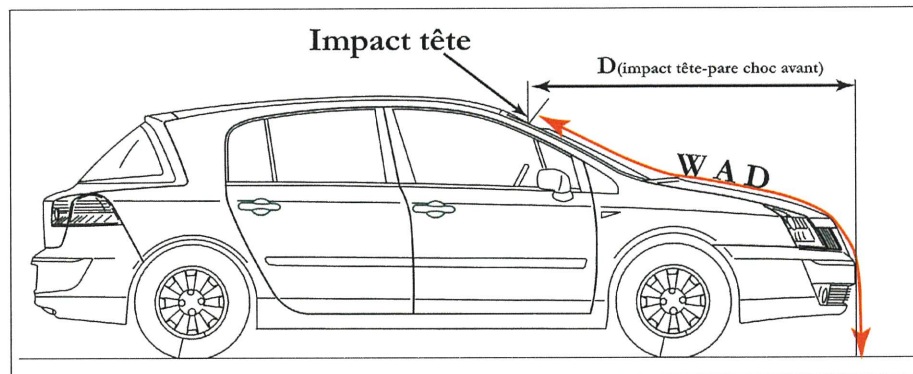


FIGURE 4 – Distance développée (WAD) et  $D_{(\text{impact tête - pare choc avant})}$ .





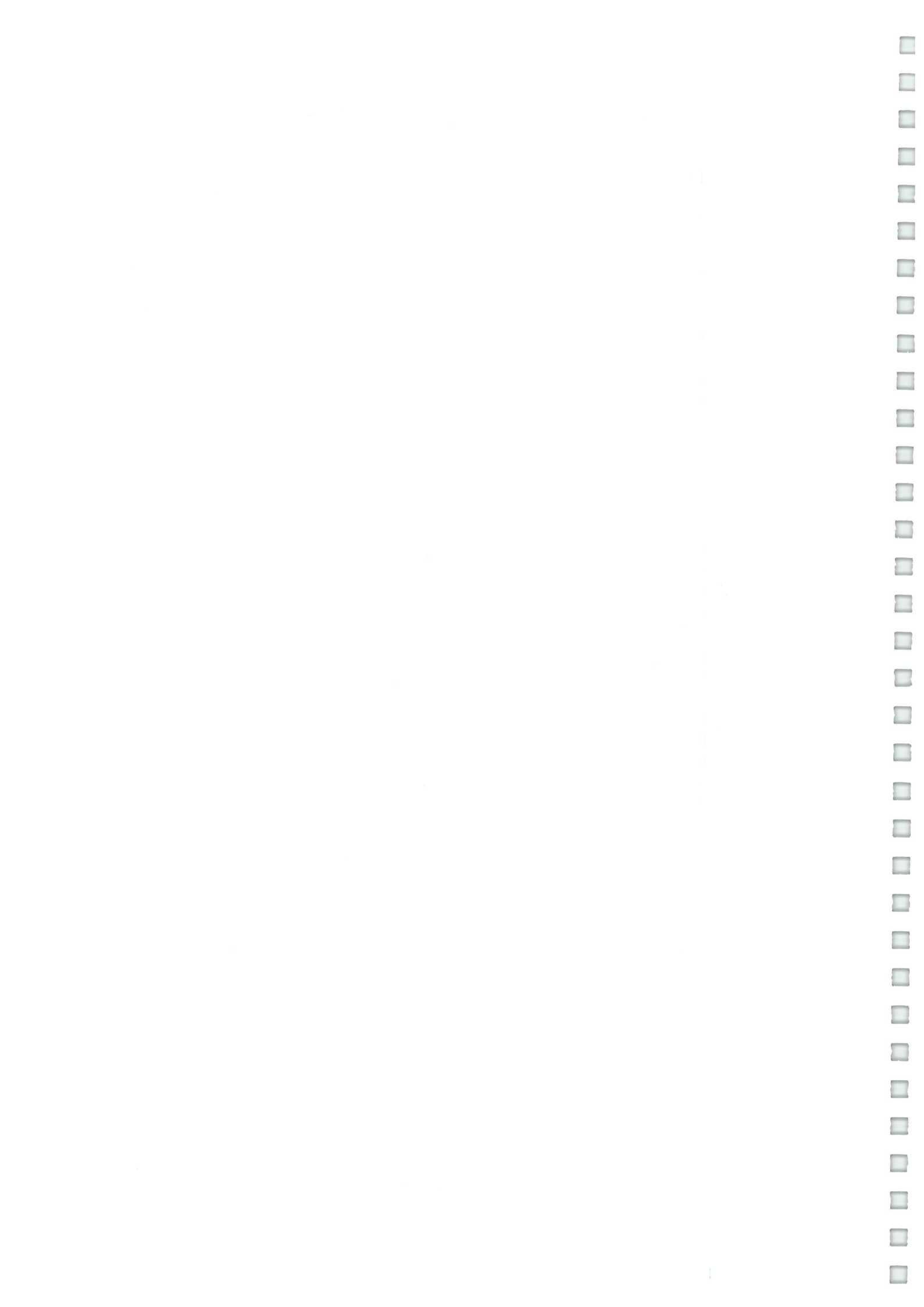
### 3.6 Piéton

Usager de la route autre que l'occupant d'un véhicule. (voir [23]).

### 3.7 Caractéristiques de la géométrie avant des voitures

Suivant DANNER et al [5], les caractéristiques géométriques de l'avant du véhicule peuvent être divisées en trois catégories (*confer* FIG. 5 page 15) :

- Les paramètres principaux :
  - $\alpha$  : Angle d'inclinaison du pare-choc et de la partie inférieure du capot par rapport au sol,
  - $R$  : Rayon de courbure de la partie inférieure du capot,
  - $h_F$  : Hauteur de la partie inférieure du capot par rapport au sol,
  - $d_B$  : Distance horizontale entre la partie la plus saillante du pare-choc et la partie inférieure du capot.
  
- Les paramètres secondaires :
  - $\alpha_W$  : Angle d'inclinaison du pare-brise,
  - $l_L$  : Épaisseur du pare-choc (partie saillante),
  - $l_F$  : Distance horizontale entre la baie inférieure de pare-brise et l'extrémité du pare-choc,
  - $l_B$  : Longueur horizontale du capot,
  - $h_B$  : Hauteur du pare-choc par rapport au sol.
  
- Et les paramètres additionnels :
  - $\beta$  : Angle d'inclinaison du capot par rapport à l'horizontal,
  - $h_C$  : Hauteur de la voiture,
  - $h_S$  : Hauteur du pare-choc,
  - $l_T$  : Distance horizontale entre la baie supérieure du pare-brise et l'extrémité du pare-choc.



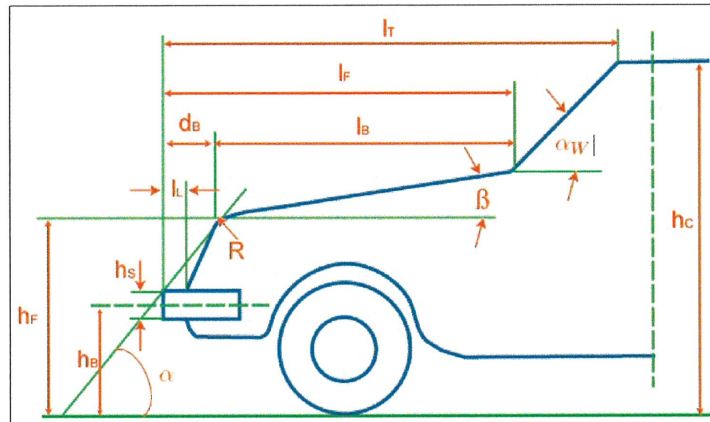


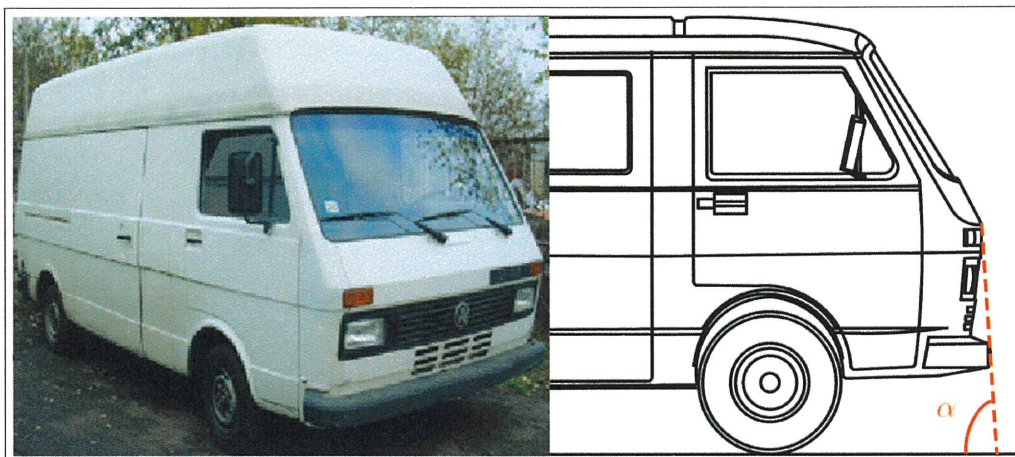
FIGURE 5 – Définitions des paramètres géométriques de la face avant d'une voiture particulière.

### 3.8 Classification des véhicules en fonction de la géométrie avant

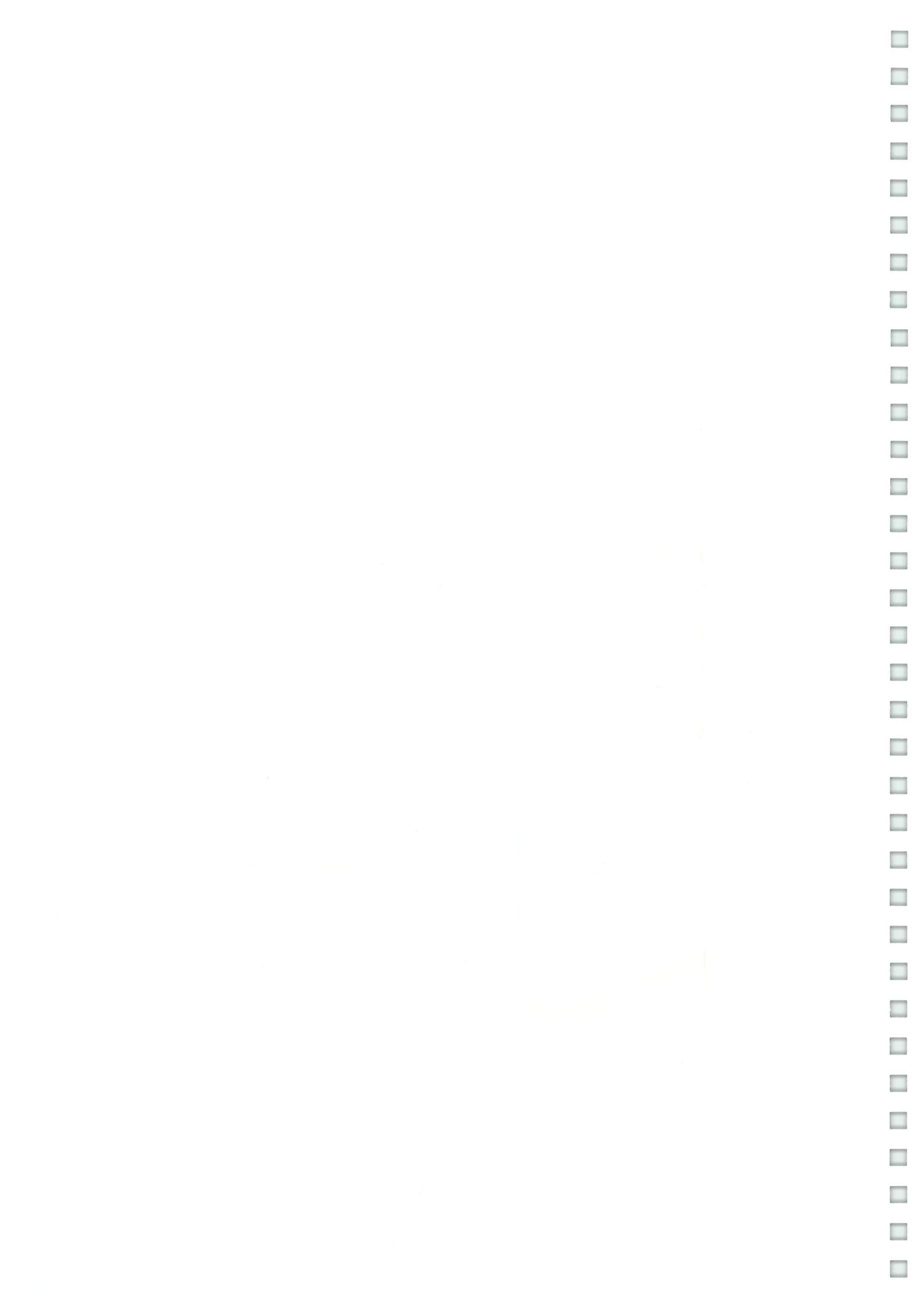
#### 3.8.1 Classification ancienne

Une première classification des véhicules en fonction de leur géométrie a été proposée en 1979 par DANNER et al [5]. Celle-ci se divise en trois grandes familles :

- en forme de “boîte” (“box” form) :

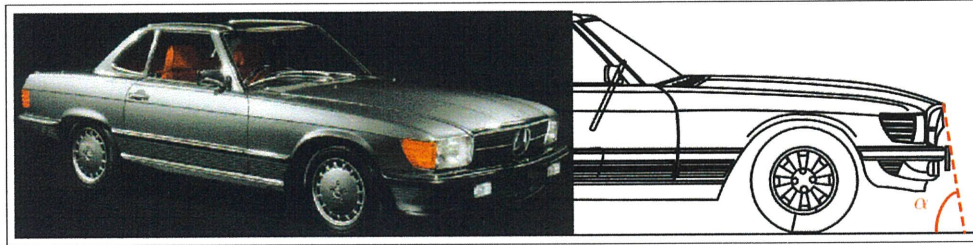


$\alpha > 81^\circ$



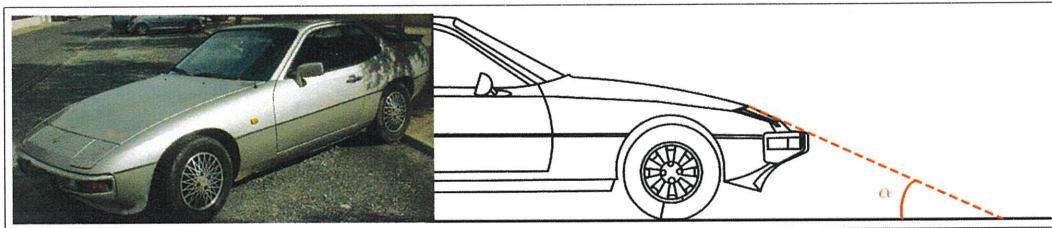


– en forme de “flotteur” (“pantoon” form) :



type “T”	$\alpha > 81^\circ$
type “P”	$60^\circ \leq \alpha \leq 81^\circ$

– en forme de “V” (“V” form) :



en forme de “coccinelle” (beetle shape)	$30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$
en forme de “V” (V shape)	$\alpha \leq 35^\circ$

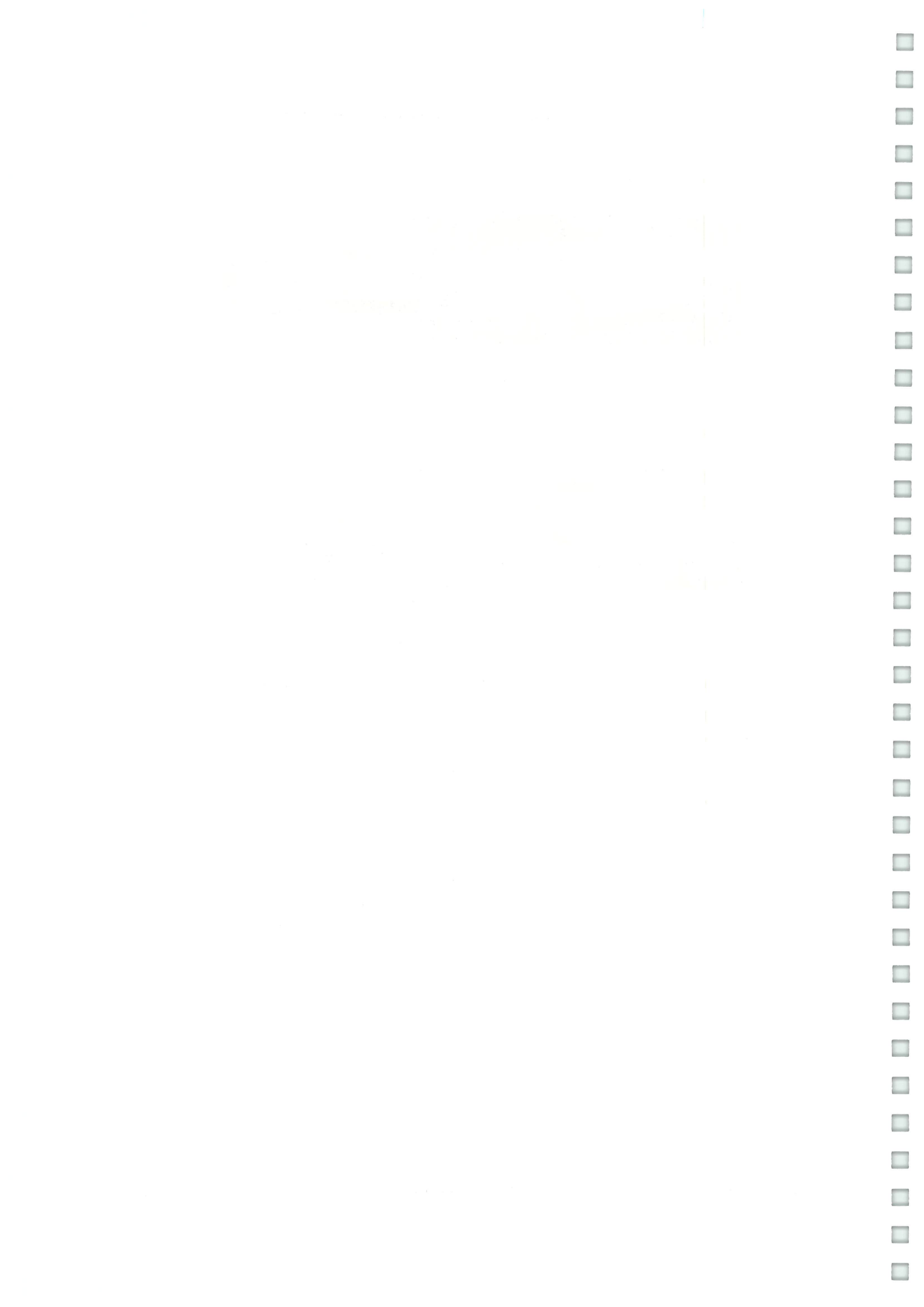
### 3.8.2 Classification plus récente donnée par le DEKRA

Une classification plus récente est incluse dans [21] écrit par MOSER et al en 2000. Cette classification se divise en quatre familles de forme avant de véhicules.

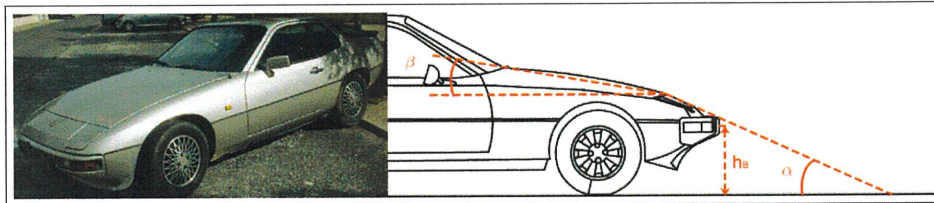
La géométrie avant des véhicules est caractérisée par la hauteur du pare-choc, l’inclinaison du capot et de la face avant par rapport à l’horizontal.

COIN	TRAPÈZE	FLOTTEUR	BOITE

TABLE 1 – Classification des véhicules de tourisme en fonction de leurs géométries avant issue de [21].

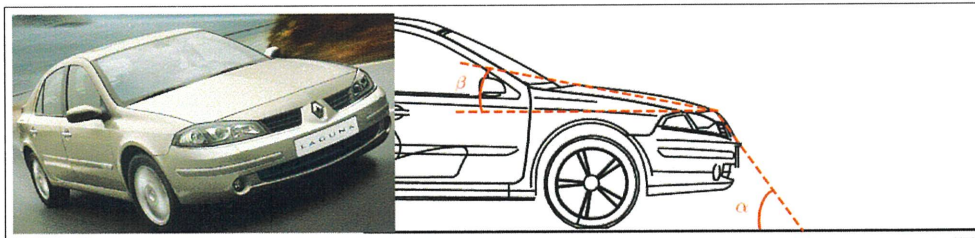


- en forme de "coin" (wedge shape) :

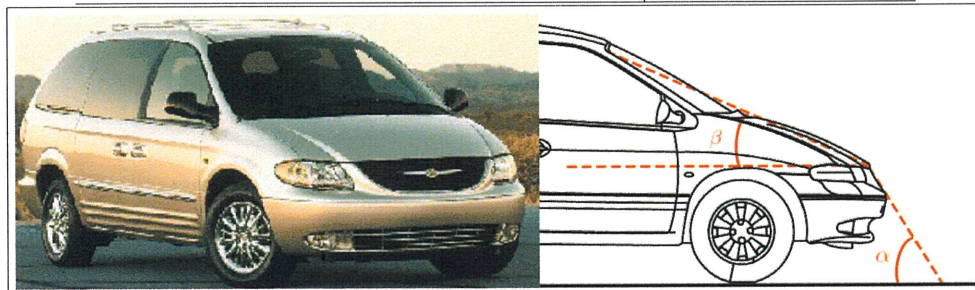


$$h_B \leq 0.7 \text{ m et } \beta \leq 20^\circ$$

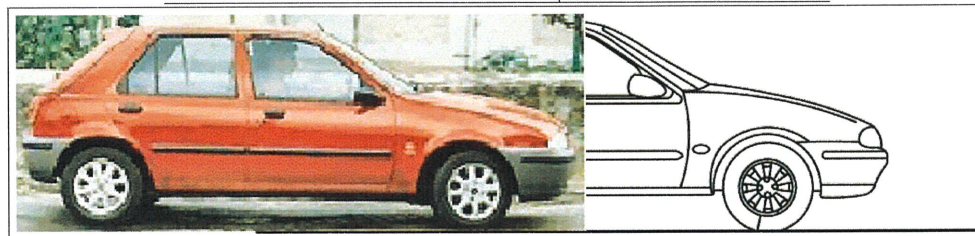
- en forme de "trapèze" (trapezoidal shape) :



$$\text{capot faiblement incliné (shallow bonnet) } | \alpha \leq 70^\circ \text{ et } \beta \leq 20^\circ$$



$$\text{capot incliné (steep bonnet) } | \alpha \leq 70^\circ \text{ et } \beta > 20^\circ$$

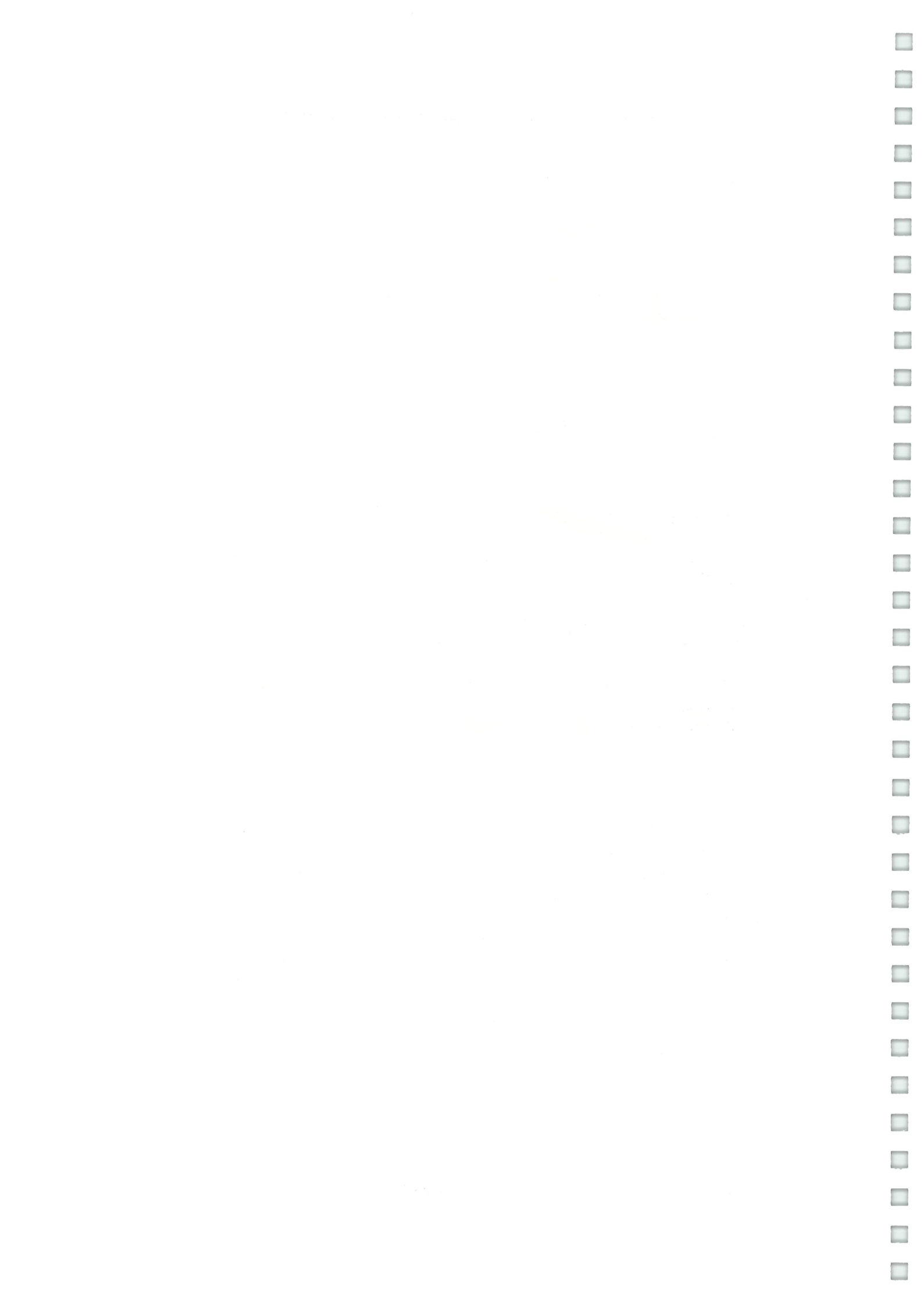


$$\text{avec bord avant en forme d'ellipse (ellipsoidal front) } | R > 0.25 \text{ m}$$

- en forme de "flotteur" (pontoon shape) :

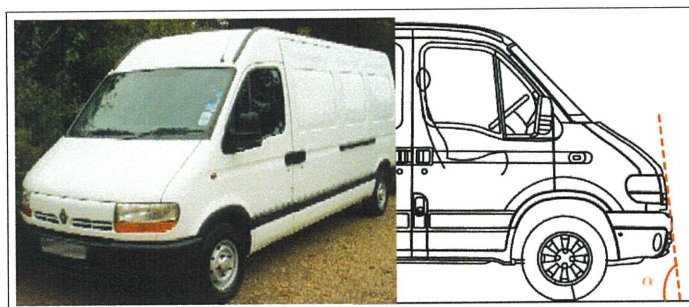


$$\alpha > 70^\circ$$





- en forme de “boîte” (box shape) :



$$\alpha \simeq 90^\circ$$

Nous utiliserons la classification la plus récente donnée par le DEKRA étant donné qu'elle permet de prendre en compte la forme avant des véhicules actuelles.

### 3.9 Trajectoire cinématique du piéton

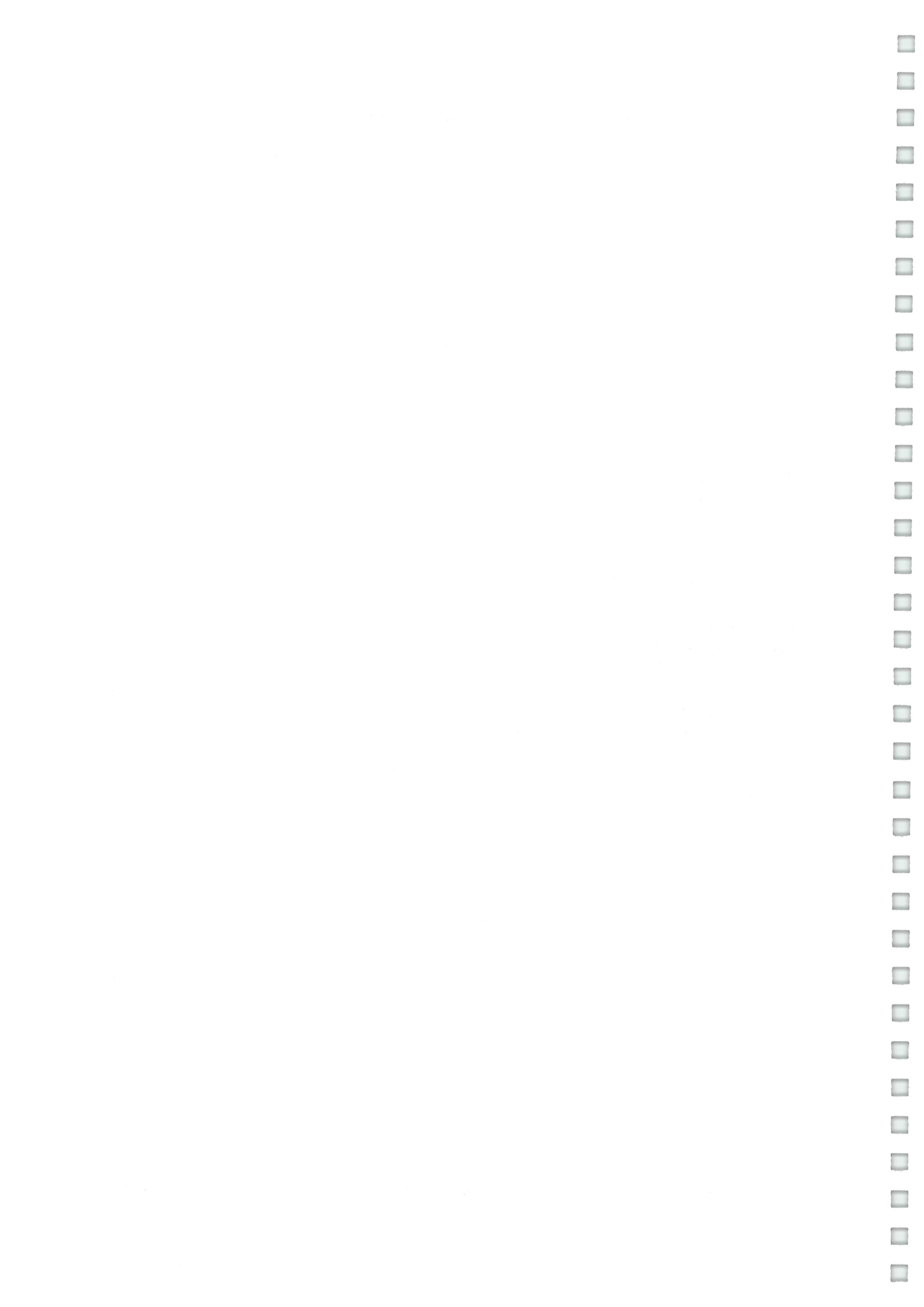
Le mouvement du piéton après choc est conditionné par la vitesse qu'il atteint et l'angle suivant lequel il est projeté (*confer* FIG. 32 page 53). Ces deux paramètres déterminent la projection et la trajectoire post-impact du piéton. A ce sujet, RAVANI et al [24] ont établi une classification comprenant cinq types de trajectoire post-impact différentes du piéton qui sont devenues *de facto* des normes standards couramment utilisées par les experts en accidentologie :

- la trajectoire enroulée (WRAP trajectory),
- la projection vers l'avant (Forward projection),
- la projection de côté (Fender vault),
- la projection au dessus du toit (Roof vault),
- et la trajectoire enroulée avec “saut-périlleux” (Somersault).

#### 3.9.1 Trajectoire enroulée (WRAP trajectory)

Lors d'une trajectoire enroulée, les membres inférieurs du piéton entrent en contact avec la face avant du véhicule (pare-choc). Ensuite, la partie supérieure des jambes et/ou le bassin s'“enroulent” sur le bord inférieur du capot, puis la tête et le thorax impactent le capot ou le pare-brise du véhicule. Typiquement, lors de ce type de projection le piéton est percuté par un véhicule en décélération et la hauteur du point de contact piéton/véhicule se situe alors en dessous du CG du piéton. En général, ce type de trajectoire concerne un véhicule décélérant avant ou juste après le premier choc. Il s'agit de la trajectoire post-impact la plus couramment rencontrée (45.2 %).





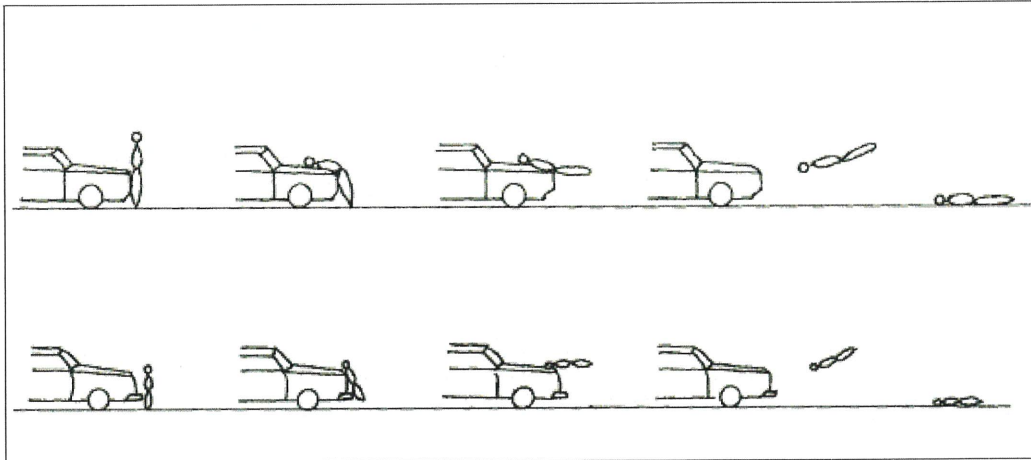


FIGURE 6 – Trajectoire post-impact du piéton de type trajectoire enroulée (WRAP). Illustration extraite de [24].

### 3.9.2 Projection vers l'avant (Forward projection)

Lors d'une projection vers l'avant, la totalité ou la quasi-totalité du corps du piéton entre en contact avec la partie avant du véhicule puis est projetée directement en avant dans le sens de déplacement du véhicule. Cela se produit typiquement lorsqu'un piéton adulte se fait percuter par un véhicule en forme avant de type "boîte" ou lorsqu'un enfant de petite taille est percuté par un véhicule "classique". La projection peut être également rencontrée dans le cas où le véhicule freine avant ou juste après le premier choc. Pour qu'une telle projection ait lieu, le point de contact initial piéton/véhicule doit se situer au dessus ou proche du CG du piéton selon WOOD et al. [50]. Ce type de projection peut également être observée lorsqu'un véhicule en forme avant de type "flotteur" ou "trapézoïdale" impacte à faible vitesse (moins de 15 km/h) un piéton. En effet, dans ce cas de figure, la vitesse est insuffisante pour initier une rotation du corps autour du capot du véhicule. Le corps du piéton se "plie" plus qu'il ne s'enroule sur la partie basse du capot. Selon RAVANI, la projection vers l'avant est la seconde trajectoire post-impact la plus fréquemment rencontrée (34.4 %).



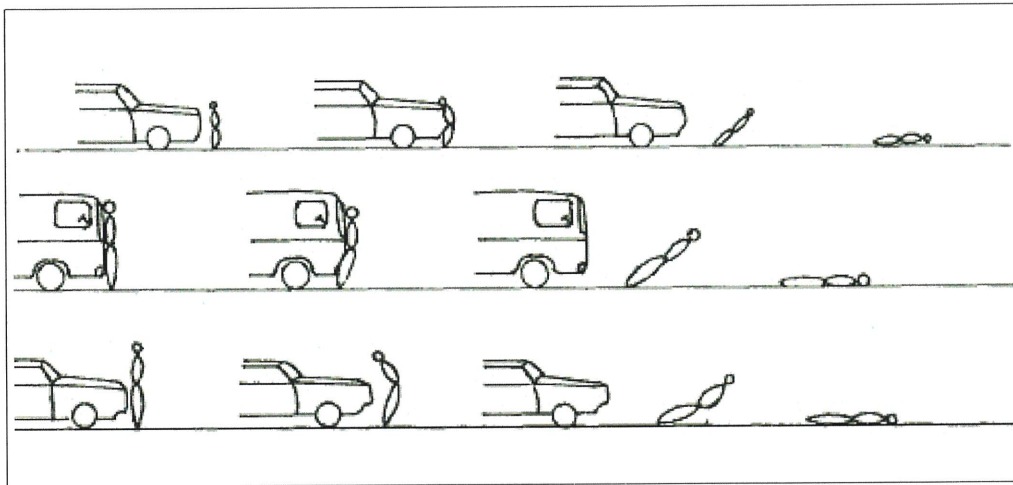


FIGURE 7 – Trajectoire post-impact du piéton de type projection vers l’avant (Forward projection). Illustration extraite de [24].

### 3.9.3 Projection de côté (Fender vault)

Lors d’une projection de côté, le piéton se situe devant l’extrémité (coin) avant gauche ou droite du véhicule lors de l’impact. Le corps du piéton s’enroule autour de la partie inférieure du capot puis son thorax et sa tête tombent sur le côté de l’aile avant du véhicule (avec ou sans contact). Elle concerne un véhicule qui est décéléré ou non. Lors de ce type d’impact, le piéton n’atteint pas une vitesse similaire au véhicule à la fin de la phase de contact. D’une certaine façon, la projection de côté peut être considéré comme un impact “incomplet” entre la voiture et le piéton. (*i.e.* seulement une partie du corps a été en contact avec le véhicule). Selon RAVANI, la projection de côté représente 13.3 % des types de trajectoire post-impact.

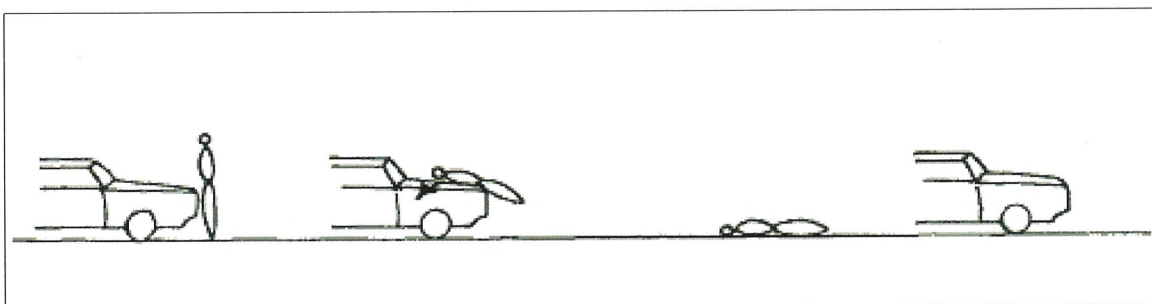
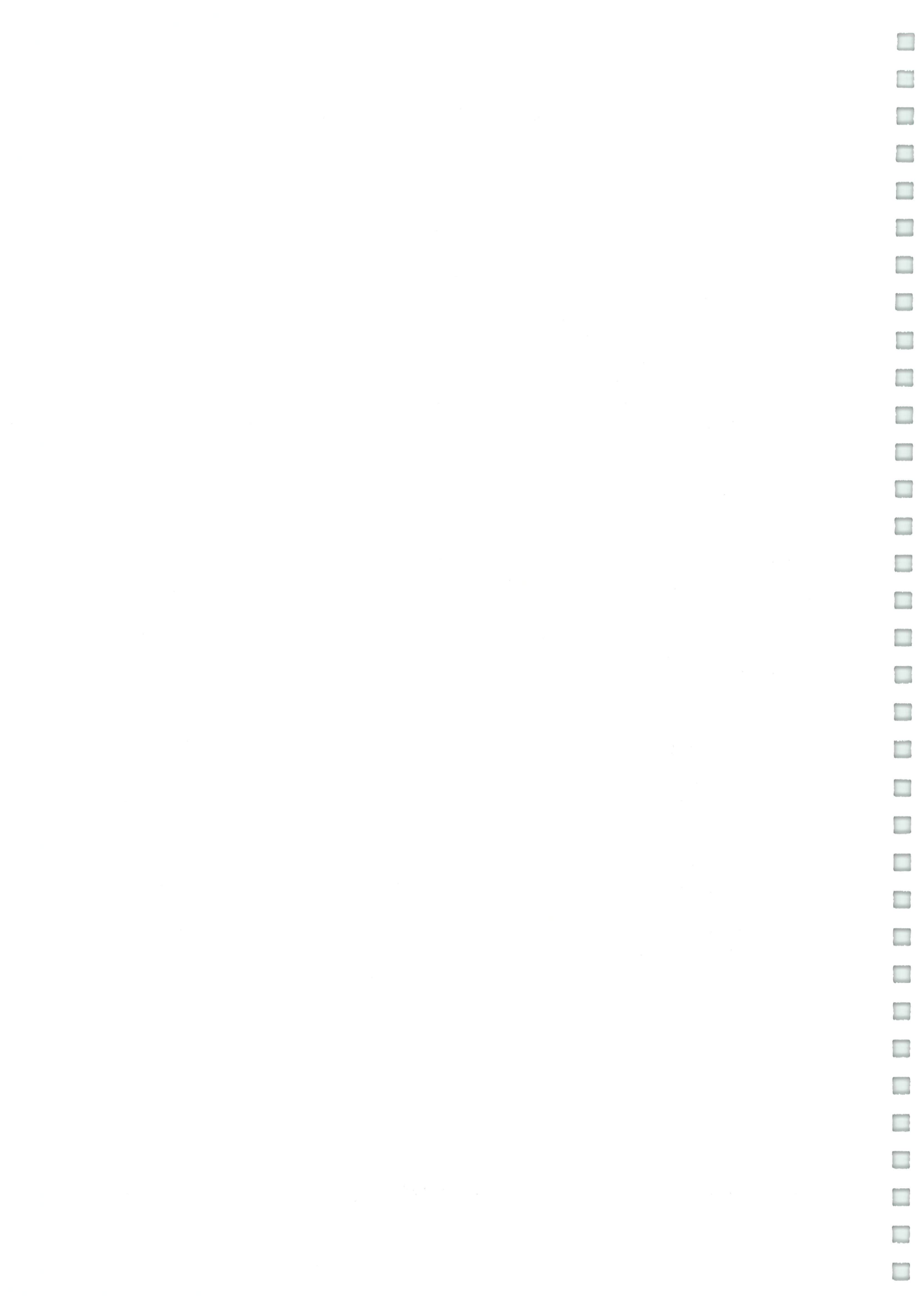


FIGURE 8 – Trajectoire post-impact du piéton de type projection sur le côté (Fender vault). Illustration extraite de [24].



### 3.9.4 Projection au dessus du toit (Roof vault)

Lors de ce type de projection, la tête et le thorax pivote et heurte le capot du véhicule puis les membres inférieurs effectuant une rotation par dessus le tronc. Le corps du piéton se retourne ensuite au dessus du pavillon du véhicule puis tombe au sol derrière celui-ci. La projection au dessus du toit indique normalement que le véhicule impactant ne freine ni avant ni pendant la phase de contact, ou que la vitesse du véhicule est élevée (supérieure à 60 km/h pour un véhicule en forme avant de type “flotteur” ou “trapézoïdale”). Ce type de projection peut survenir également lorsque le CG du piéton est très haut (personne de grande taille) relativement à la hauteur du point de contact véhicule/piéton, ce qui a pour effet d’augmenter la vitesse de rotation du corps du piéton. Notons que lors de ce type de projection, le véhicule passe en dessous du piéton après l’impact, et que ce dernier présente le plus souvent de multiples fractures. Selon RAVANI, la projection au dessus du toit représente 5.4 % des types de trajectoire post-impact.

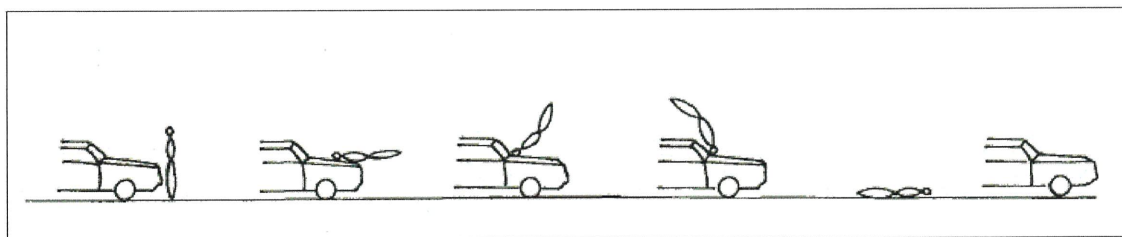
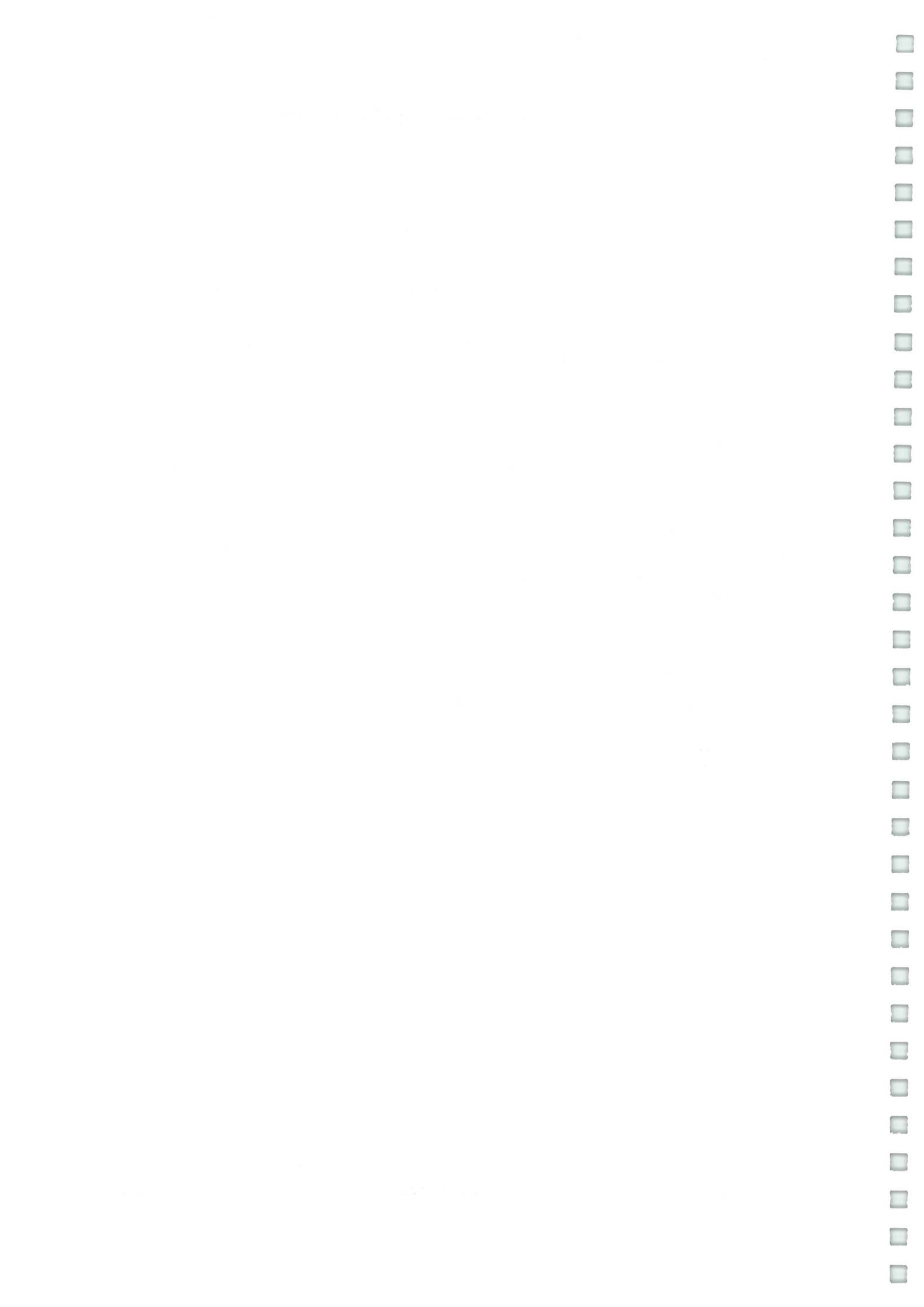


FIGURE 9 – Trajectoire post-impact du piéton de type projection au dessus du toit. Illustration extraite de [24].

### 3.9.5 Trajectoire enroulée avec “saut-périlleux” (Somersault)

C’est la trajectoire la moins souvent rencontrée (1.7 % selon RAVANI). Il s’agit en fait d’une extension de la trajectoire enroulée avec la particularité suivante : le piéton effectue une rotation complète dans les airs avant de retomber au sol. Ce type de trajectoire survient le plus souvent lorsqu’un véhicule circulant assez rapidement freine brutalement au moment de l’impact. Le tangage alors induit, diminue la hauteur de contact piéton/véhicule et l’énergie transférée au corps du piéton devient suffisamment élevée pour augmenter considérablement la rotation de celui-ci. Selon RAVANI [24], dans ce cas de figure, les blessures du piéton imputables au choc avec le véhicule et celles liées au premier contact contre le sol ne sont généralement pas situées du même côté du corps.





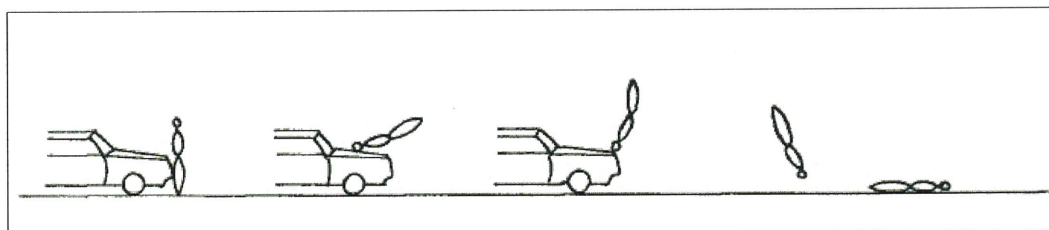
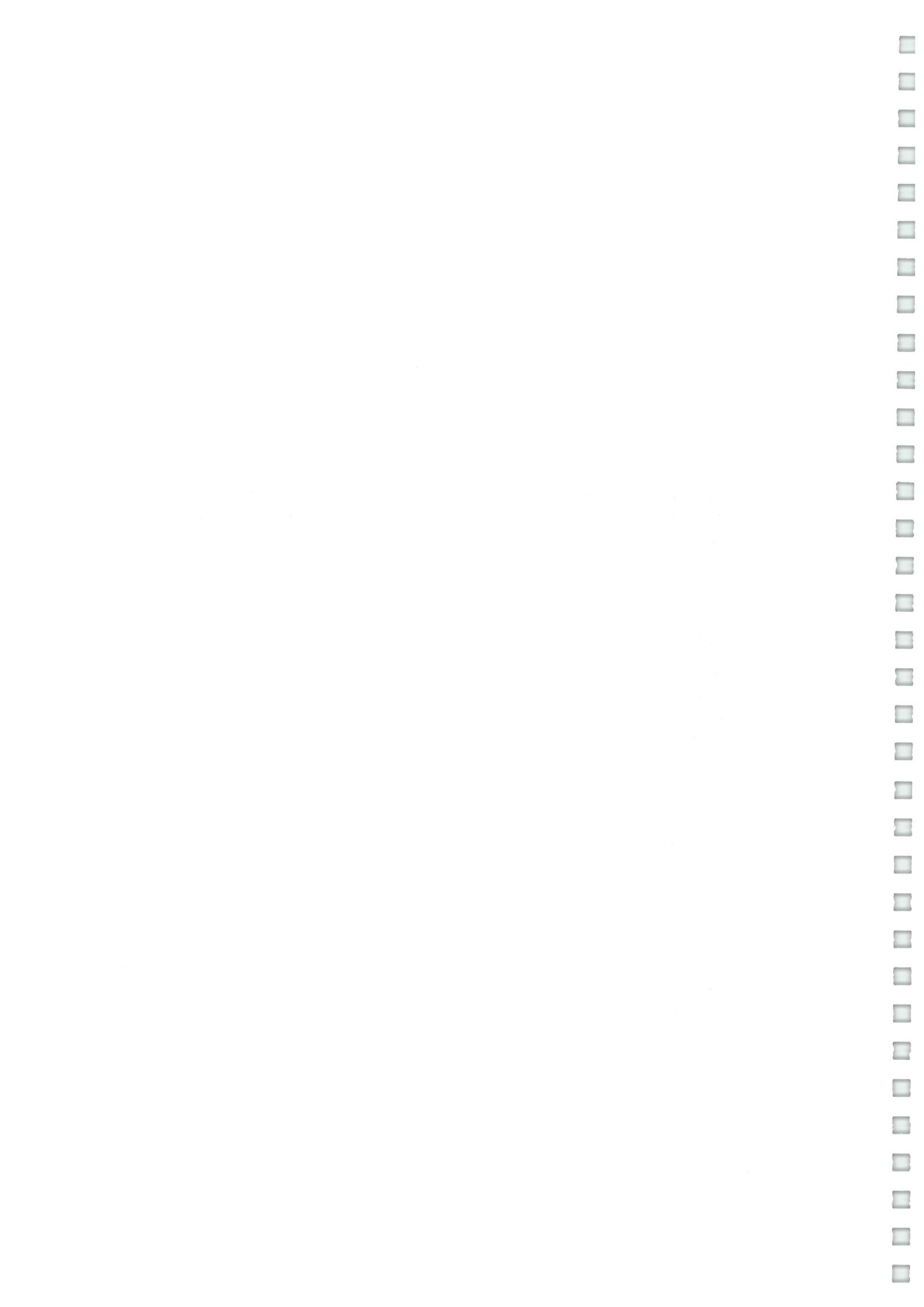


FIGURE 10 – Trajectoire post-impact du piéton de type trajectoire enroulée avec “saut périlleux”. Illustration extraite de [24].

**Nota Bene** : Dans la littérature, il existe un autre type de trajectoire post-impact piéton défini par EUBANKS et HILL [11] appelée : projection partielle de côté (partial or restricted fender fault). Il s’agit en fait d’une projection de côté modifiée par la présence d’un obstacle (*e.g.* véhicule en stationnement). Par ailleurs, dans le livre intitulé **Pedestrian and Cyclist Impact**, SIMMS et WOOD [36] montrent à partir de courbes donnant la vitesse d’impact du véhicule en fonction de la distance de projection, que pour une vitesse donnée la distance de projection du piéton est légèrement supérieure en projection vers l’avant comparativement au cas de trajectoire enroulée. Ceci s’explique par un transfert de quantité de mouvement de la voiture vers le piéton plus élevé en projection vers l’avant.

La classification présentée ci-dessus doit prendre en compte les éléments suivants :

- la vitesse d’impact du véhicule,
- la décélération pre et post-impact du véhicule,
- la hauteur du CG du piéton par rapport à la hauteur du point de contact sur le véhicule,
- la géométrie de la face avant du véhicule,
- la position résiduelle du piéton rapportée à celle du véhicule.



# Chapitre 4

## Facteurs ayant une influence sur la trajectoire du piéton

Étant donné la complexité des accidents véhicule contre piéton, ce chapitre a pour objet de faire la discrimination des facteurs majeurs des autres (mineurs) qui ont une influence sur le mouvement du piéton pendant et après le choc .

### 4.1 Facteurs majeurs

#### 4.1.1 Vitesse d'impact du véhicule

Étant donné qu'un véhicule impactant un piéton possède une quantité de mouvement importante (en comparaison à celle du piéton), il est normal de considérer la vitesse du véhicule comme un paramètre très influant et déterminant, notamment sur sa trajectoire post-impact du piéton. On retiendra principalement que la distance longitudinale de projection augmente avec la vitesse d'impact du véhicule (voir [28]) .

#### 4.1.2 Vitesse de déplacement du piéton au moment de l'impact

Même si la quantité de mouvement du piéton est généralement très faible et quasi totalement absorbée par celle du véhicule léger au moment de l'impact, l'étude faite par ROHM [27] avec des mannequins a montré que la vitesse du piéton est un paramètre ayant une importance très significative sur la distance transversale de projection et sur la largeur quantitative du choc.

En l'occurrence, ROHM montre que la vitesse<sup>1</sup> de déplacement du piéton peut être déduite de la distance transversale pour une vitesse d'impact du véhicule donnée. On notera que pour des vitesses d'impacts élevées, ces considérations n'ont plus de sens en ceci que lors des collisions, les véhicules sont généralement très déformés et les vitesses des piétons totalement absorbées.

---

1. On remarquera aussi que indépendamment de la vitesse pratiquée par le piéton au moment de l'impact, son sens de déplacement peut être corrélé à la distance transversale de projection.



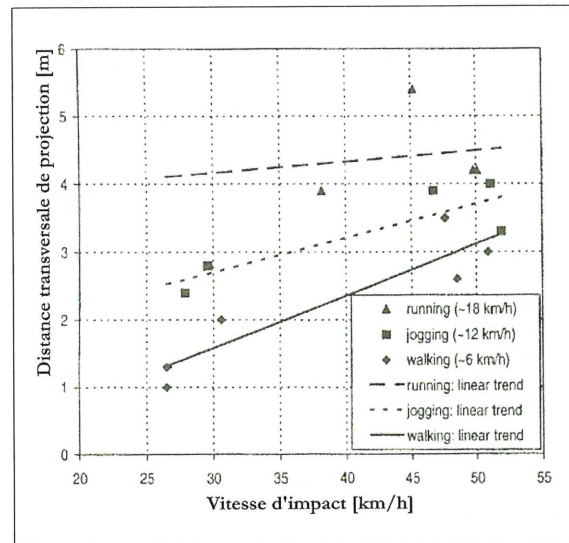


FIGURE 11 – Distance transversale de projection du piéton en fonction de sa vitesse et de la vitesse d'impact du véhicule

Par ailleurs, eu égard à la largeur quantitative du choc mesurée sur le véhicule, ROHM montre que pour des vitesses de choc inférieures à 45 km/h, la vitesse du piéton est déductible de la largeur quantitative pour une vitesse donnée. Au-delà de 45 km/h, statuer sur la vitesse du piéton devient trop approximatif et seul le sens de déplacement du piéton peut être déduit. Ainsi, plus la vitesse d'impact du véhicule est élevée, plus la largeur quantitative sur le véhicule sera faible.

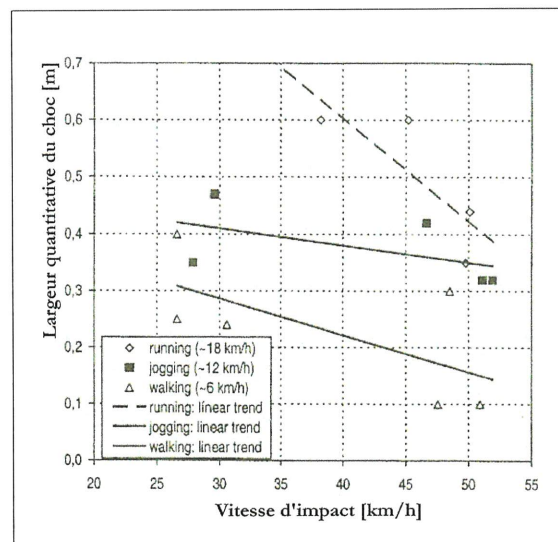


FIGURE 12 – Largeur quantitative du choc en fonction de la vitesse du piéton et de la vitesse d'impact du véhicule





### 4.1.3 Forme avant des véhicules

Au paragraphe 3.8.2 page 16, nous avons défini 4 familles de véhicules classées suivant le type de géométrie avant. La forme de la géométrie avant du véhicule aura une importance considérable lors de l'impact. Par exemple, si le piéton est impacté par un véhicule en forme avant de type "boîte", il est évident que son mouvement sera assimilable à une translation sans rotation après que son CG aura été accéléré par le véhicule.

### 4.1.4 Taille du piéton

Ce paramètre a une incidence considérable sur le mouvement qu'aura le piéton lors de l'impact avec le véhicule. Plus la distance verticale entre le CG du piéton et le point de contact initial véhicule/piéton est élevée, plus la vitesse rotation du piéton sera importante. Si un adulte est percuté par un véhicule en forme avant de type "boîte" ou si un enfant est percuté par un véhicule en forme avant de type "flotteur", la rotation opérée par l'utilisateur vulnérable sera faible. On retiendra que tant que le CG du piéton est situé au dessus du point de contact piéton/voiture, le corps de l'utilisateur vulnérable commencera à effectuer une rotation autour de la partie inférieure du capot.

### 4.1.5 Décélération du véhicule

On retiendra que plus la décélération du véhicule est faible, plus la distance de projection du piéton sera élevée. Par ailleurs, concernant le freinage ou non du véhicule avant choc, il conviendra de ne pas considérer un freinage partiel de la part du conducteur. En effet, soit le conducteur essaie d'éviter la collision et dans ce cas effectue un freinage maximum, soit il n'y a aucun freinage. Dans la plupart des cas d'accident, le piéton est retrouvé devant la voiture, cela est dû simplement au fait que la décélération du piéton est moindre que celle du véhicule décélérant.

## 4.2 Facteurs mineurs

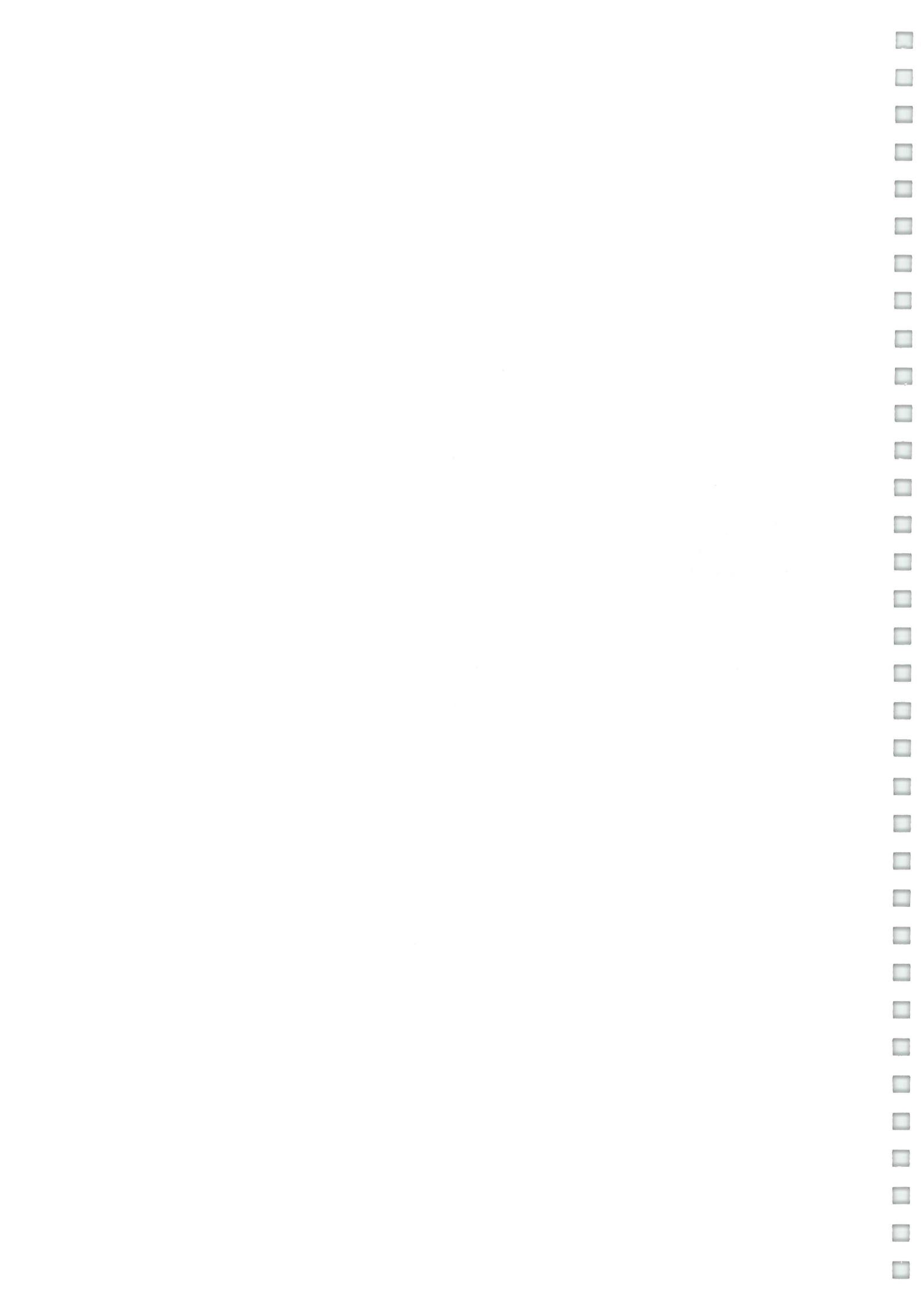
### 4.2.1 Positions des membres inférieurs du piéton lors de l'impact

Il a été démontré via des tests que la position des membres inférieurs du piéton lors de l'impact n'a aucune incidence sur le mouvement du piéton. Les jambes du piéton sont poussées vers l'avant dans la direction du choc indépendamment de leurs positions initiales.

### 4.2.2 Chaussée humide

Selon plusieurs auteurs et notamment SEARLE [31], le coefficient de frottement entre le piéton et une surface humide n'est pas très différent de celui sur surface sèche. Dès lors, l'adhérence de la chaussée n'a pas d'influence importante sur le glissement du piéton au sol.

Concernant l'influence de l'adhérence de la chaussée au niveau de l'impact primaire et du point de vue du contact piéton/sol, aucune étude n'a été réalisée.



## Chapitre 5

# Configurations spéciales de collision

### 5.1 Collision piéton sur le coin avant gauche ou droit de la voiture

Les impacts du piéton sur le coin d'une voiture sont généralement caractérisés par un recouvrement extrêmement faible (*confer* FIG 13 et 14 pages 26 et 27). Généralement, lors du contact, la vitesse du piéton n'atteint pas la vitesse du véhicule. Ce type de collision est couramment appelée collision oblique (glancing collision). Deux configurations sont présentées ici :

1. Après le contact primaire contre le coin avant, le corps s'“enroule” sur le capot du fait de sa propre vitesse de déplacement. Dans ce cas, il s'agit d'une trajectoire enroulée et les formules liées à la distance de projection peuvent être appliquées.

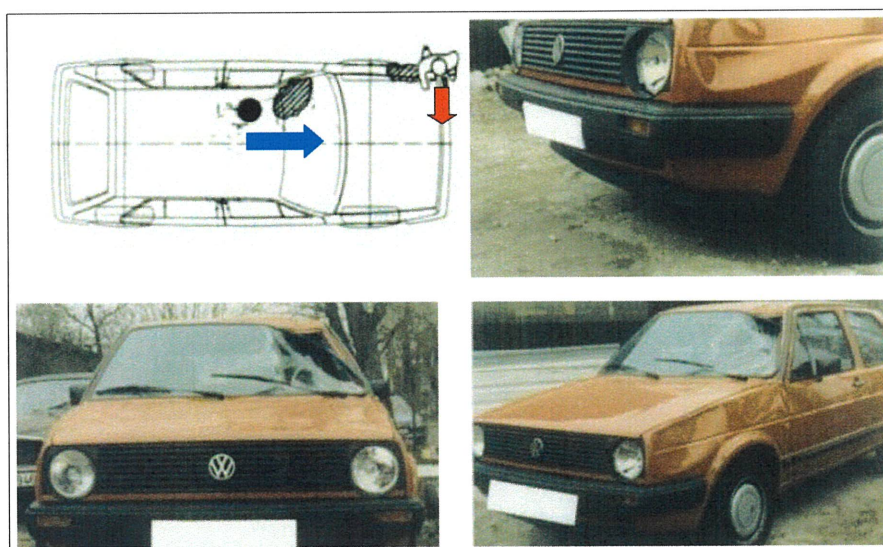
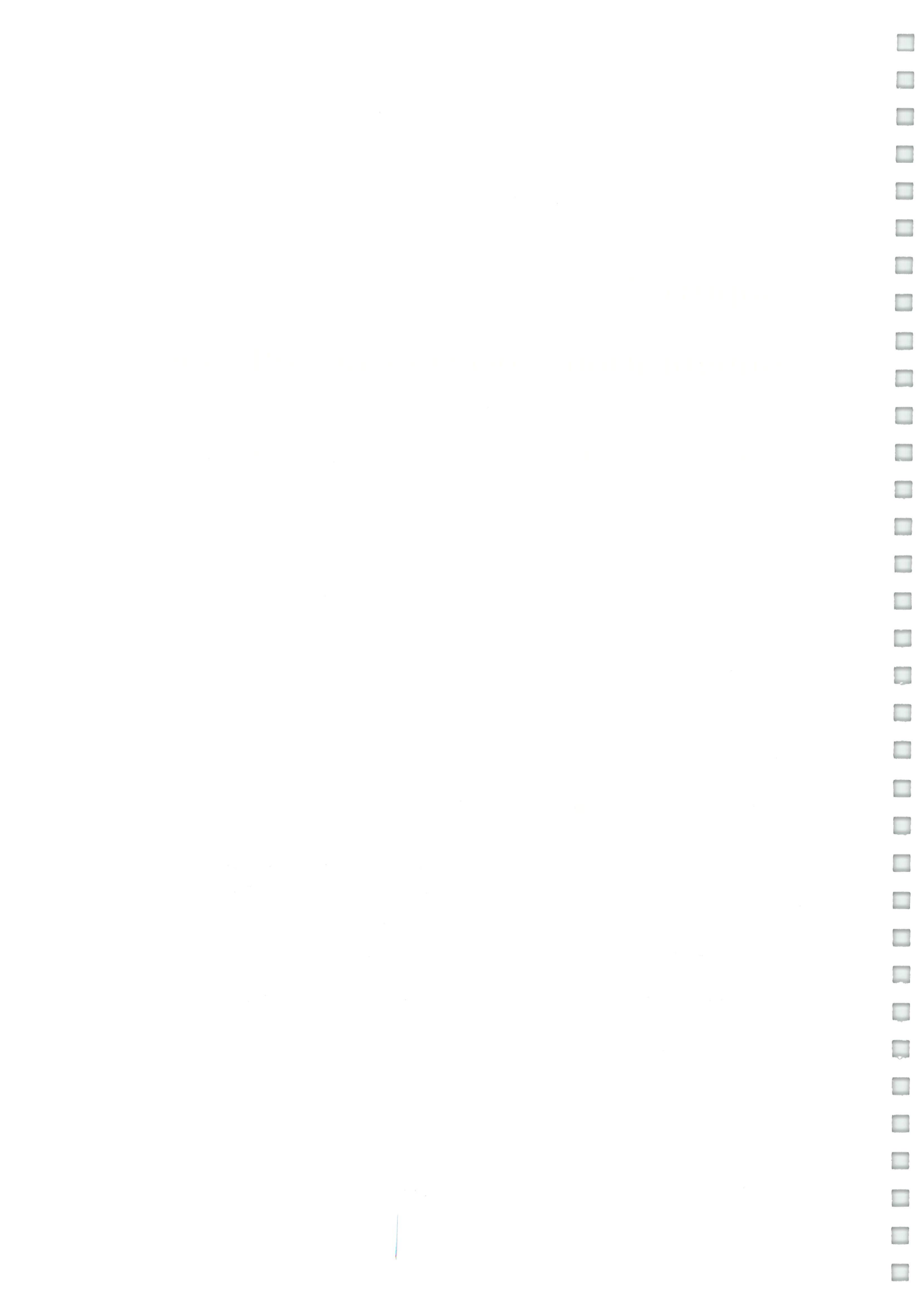


FIGURE 13 – Impact en coin suivi d'une trajectoire enroulée du piéton (illustration issue de [22]).



2. Après le contact primaire sur le coin avant du véhicule, le corps du piéton ne s’"enroule" pas sur le côté du fait de sa vitesse. Le type de trajectoire post-impact du piéton est dans ce cas une projection de côté et les formules liées à la distance de projection ne peuvent pas être appliquées.

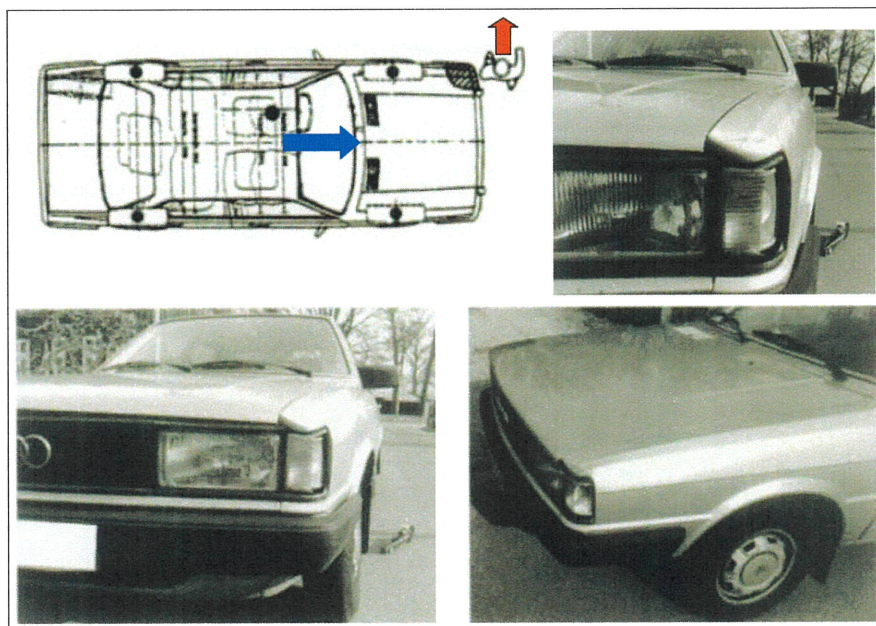


FIGURE 14 – Impact en coin suivi d’une projection de côté du piéton (illustration issue de [22]).

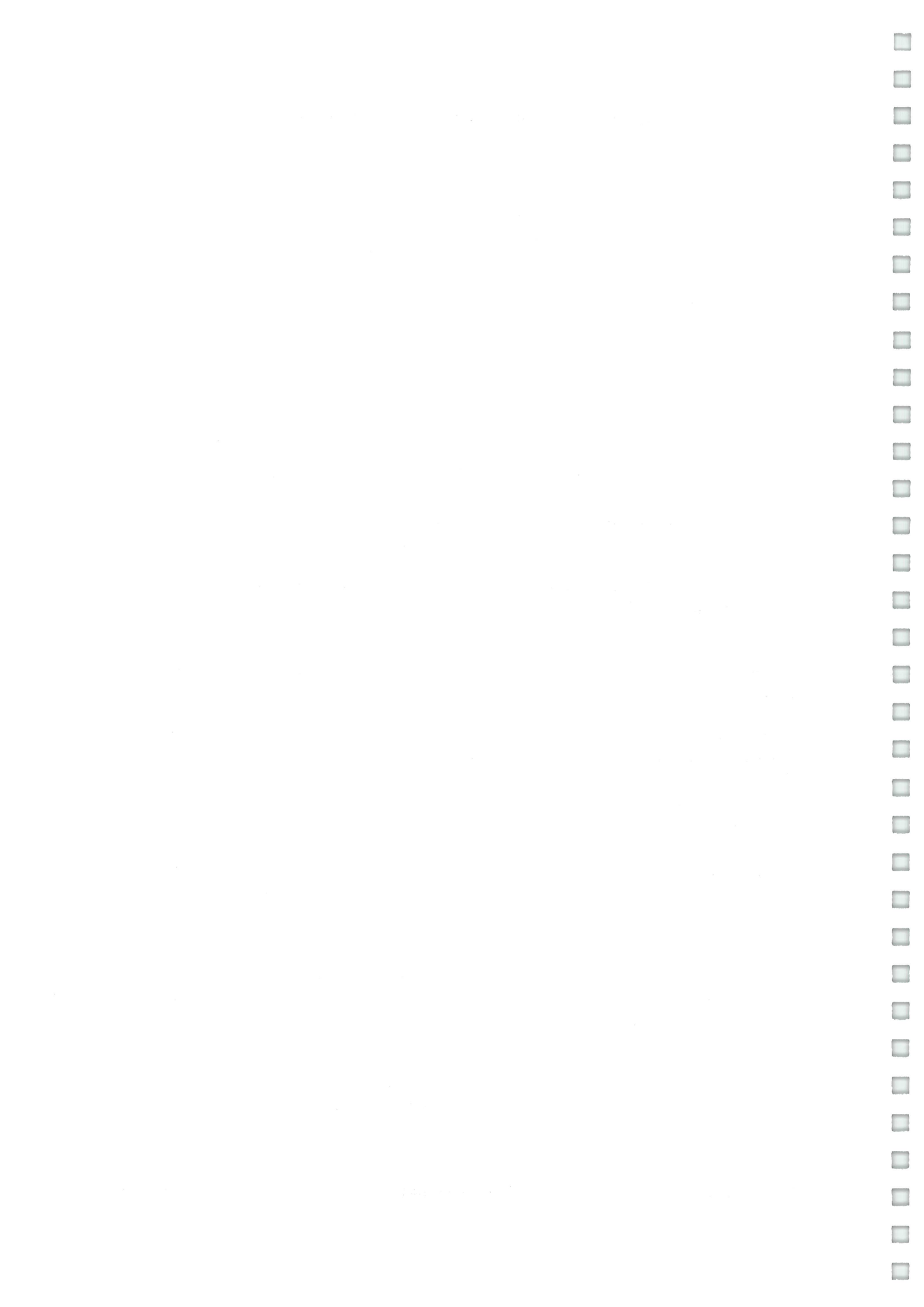
## 5.2 Impact sur le côté

Lors d’un impact sur le côté, il convient de distinguer si le piéton est percuté avant ou après le pied “A” :

(a) Si le piéton percute le véhicule derrière le pied “A”, dans ce cas l’usager vulnérable est retrouvé non loin du point d’impact et sa distance de projection est très faible (*confer* FIG. 15 page 28).

(b) En revanche, si le piéton percute le véhicule devant le pied “A” au niveau de l’aile du véhicule, le piéton peut dans ce cas prendre appui partiellement ou totalement sur la partie avant du véhicule et de ce fait être projeté assez loin de la zone d’impact (*confer* FIG. 15 page 28).





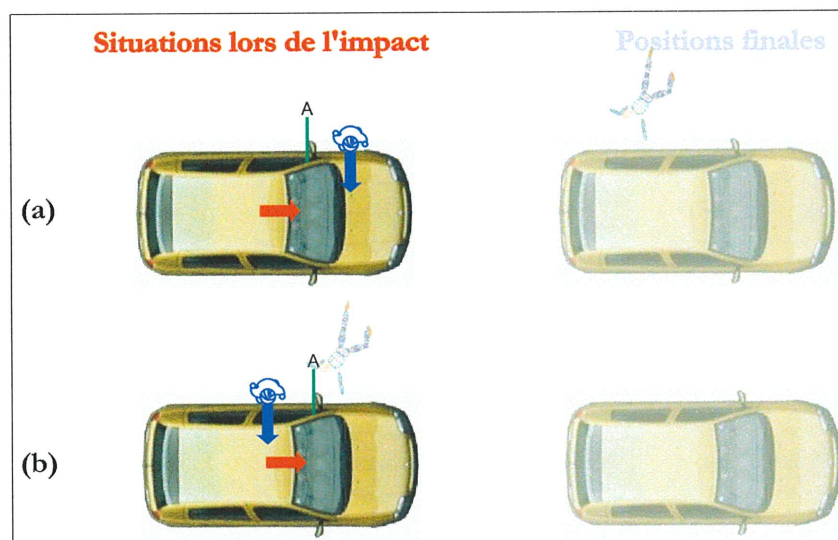


FIGURE 15 – Impact sur le côté avant et après le pied “A”.

Dans la plupart des cas concernant cette typologie, il est à noter que le conducteur n’a pas le temps de réagir face au danger.

Ainsi, compte tenu de tout ce qui a été dit précédemment, la reconstruction ne peut se baser que sur la position finale du véhicule, les dommages occasionnés sur celui-ci, et les lésions présentées par le piéton.

Notons également que des déformations importantes peuvent être relevées sur le véhicule proportionnel à la vitesse du piéton évoluant dans une direction perpendiculaire à celle du véhicule.

## 5.3 Impact ventral ou dorsal du piéton

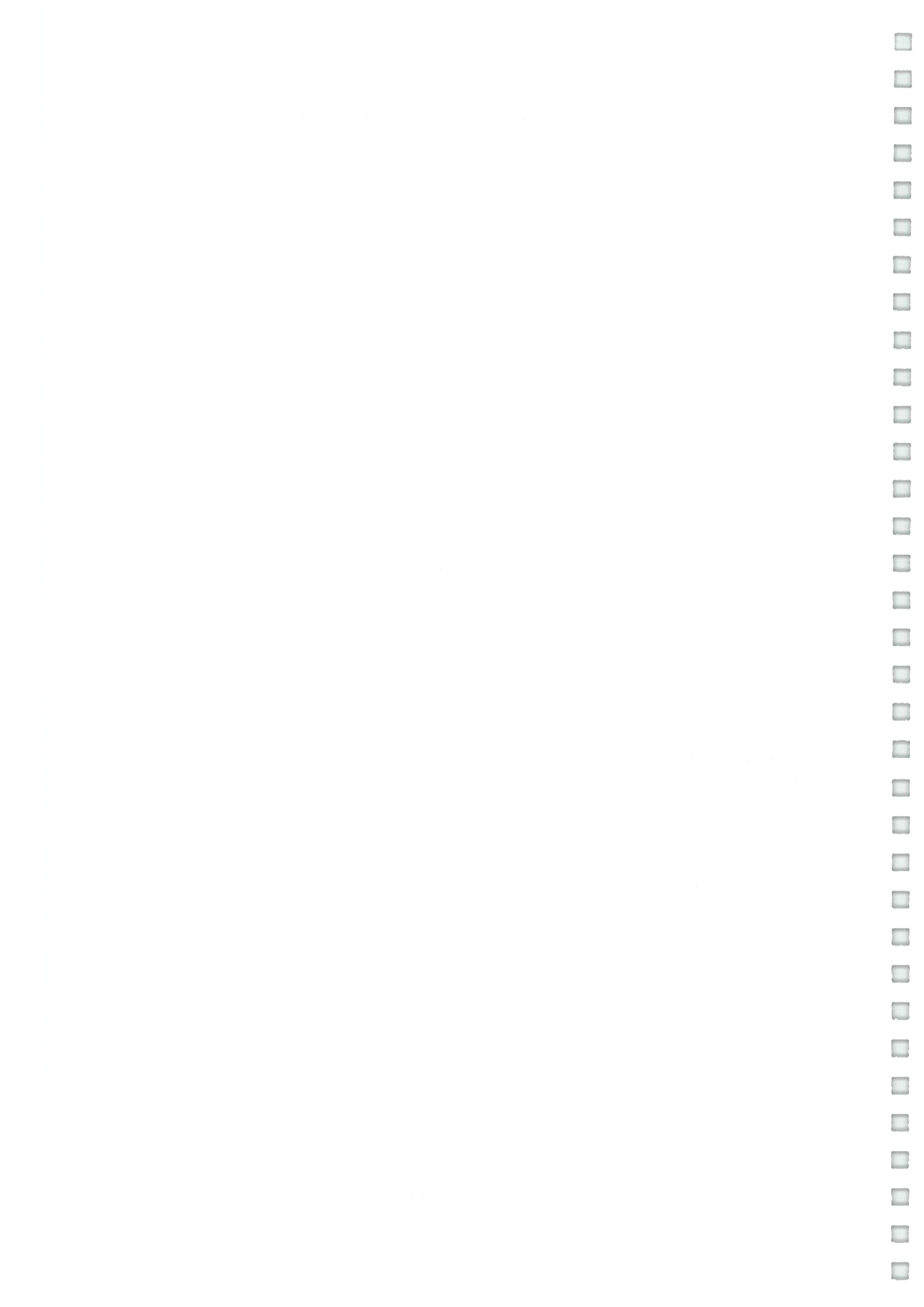
Durant la phase de contact véhicule/piéton, le mouvement de l’usager vulnérable diffère selon que celui-ci est percuté par devant (impact ventral) ou par les dos (impact dorsal).

### 5.3.1 Impact ventral

Lors d’un impact ventral, les membres inférieurs du piéton restent droits lors du contact primaire avec l’avant du véhicule alors que la partie supérieure du corps tombe vers l’avant du véhicule au niveau du capot.

### 5.3.2 Impact dorsal

Lors d’un impact dorsal, les genoux du piéton se plient immédiatement après l’impact primaire, les pieds sont alors soulevés du sol alors que la partie supérieure du corps reste



droite jusqu'à ce que le corps s'"assoie" sur le capot. Ensuite l'arrière de la tête vient percuter le capot ou le pare-brise.

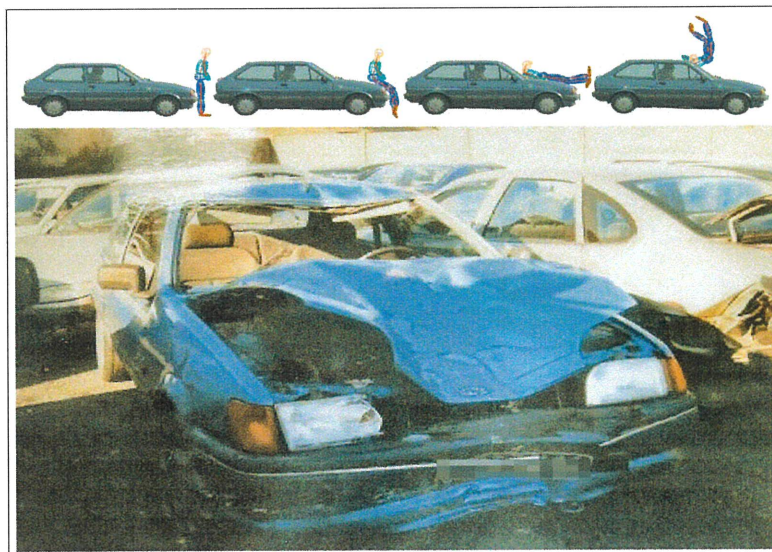
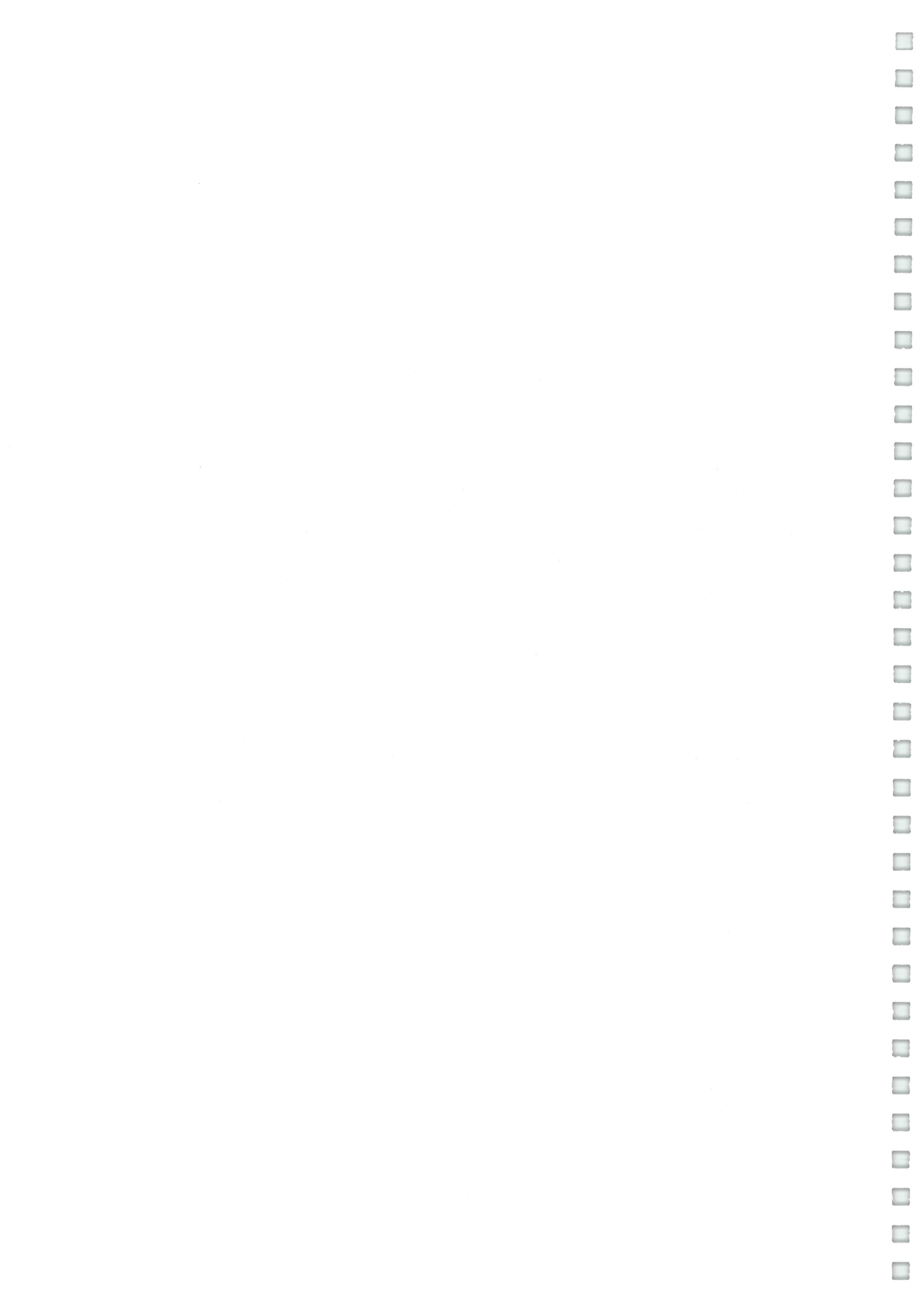


FIGURE 16 – Cas réel d'accident mortel avec impact dorsal.  $V_c=88$  km/h (projection au dessus du toit).

## 5.4 Phénomène de franchissement

On parle de franchissement lorsqu'au moins une des roues du véhicule "passe" sur au moins un des segments corporels du corps du piéton. Alors que ce phénomène est particulièrement fréquent dans les collisions impliquant des poids lourds contre piétons, il reste assez rare dans les collisions voiture contre piéton. Le franchissement peut intervenir lorsqu'un véhicule en forme avant de type "boîte" ne décélère pas après avoir impacté un piéton qui se retrouve par suite projeté vers l'avant puis au sol sur la trajectoire du véhicule. Il peut également survenir lorsqu'un piéton, percuté par une voiture puis projeté sur le côté, se retrouve alors allongé au sol devant un autre véhicule venant en sens inverse ou roulant sur une autre voie que celle du premier véhicule impactant. D'un point de vue strictement physique, il n'existe aucune relation liant l'effet de trainage (dragging effect) et la vitesse de franchissement du véhicule. Par conséquent, l'analyse de la reconstruction ne peut dès lors que s'appuyer sur la position du véhicule franchissant.



## Chapitre 6

# Localisation du point d'impact

Lors de collisions voiture contre voiture, le point d'impact est normalement localisé par une trace de grattage au sol. En revanche, dans les collisions voiture contre piéton, il n'existe peu ou pas de traces permettant d'apprécier l'endroit où a lieu le choc. Ainsi, l'accidentologue doit effectuer un travail d'inférences important en corrélant les données recueillies sur le site, les informations liées aux auditions de témoins et/ou d'impliqués, et les autres constatations. Néanmoins, dans certains accidents le point d'impact peut être localisé avec une certaine précision par différents types de traces qui sont présentés dans ce chapitre. Nous noterons que la localisation du point d'impact est fondamentale lors des calculs de vitesses.

### 6.1 Marque de chaussures

Des marques d'éraflure de chaussures peuvent être parfois relevées sur la chaussée du site de l'accident. Il s'agit plus particulièrement de trace de transfert de matière de la chaussure sur la chaussée. Elles permettent à l'accidentologue d'avoir une bonne estimation de la position du point de choc, ce qui est déterminant dans certains accidents. Ces traces apparaissent notamment lorsqu'une des jambes est au contact du sol et droite, portant ainsi tout le poids du corps. La force liée à l'impact génère alors un transfert de matière de la chaussure vers le sol par frottement.

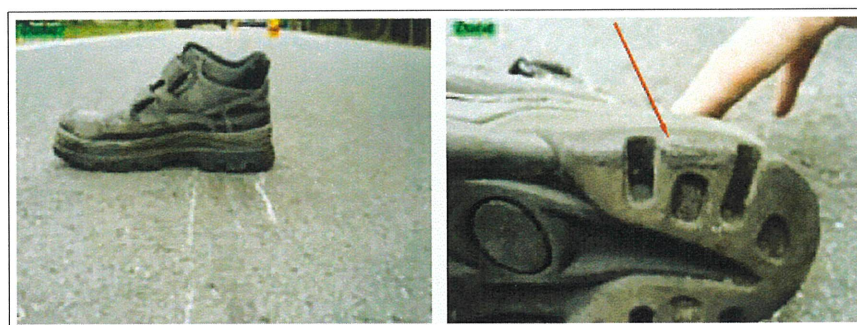
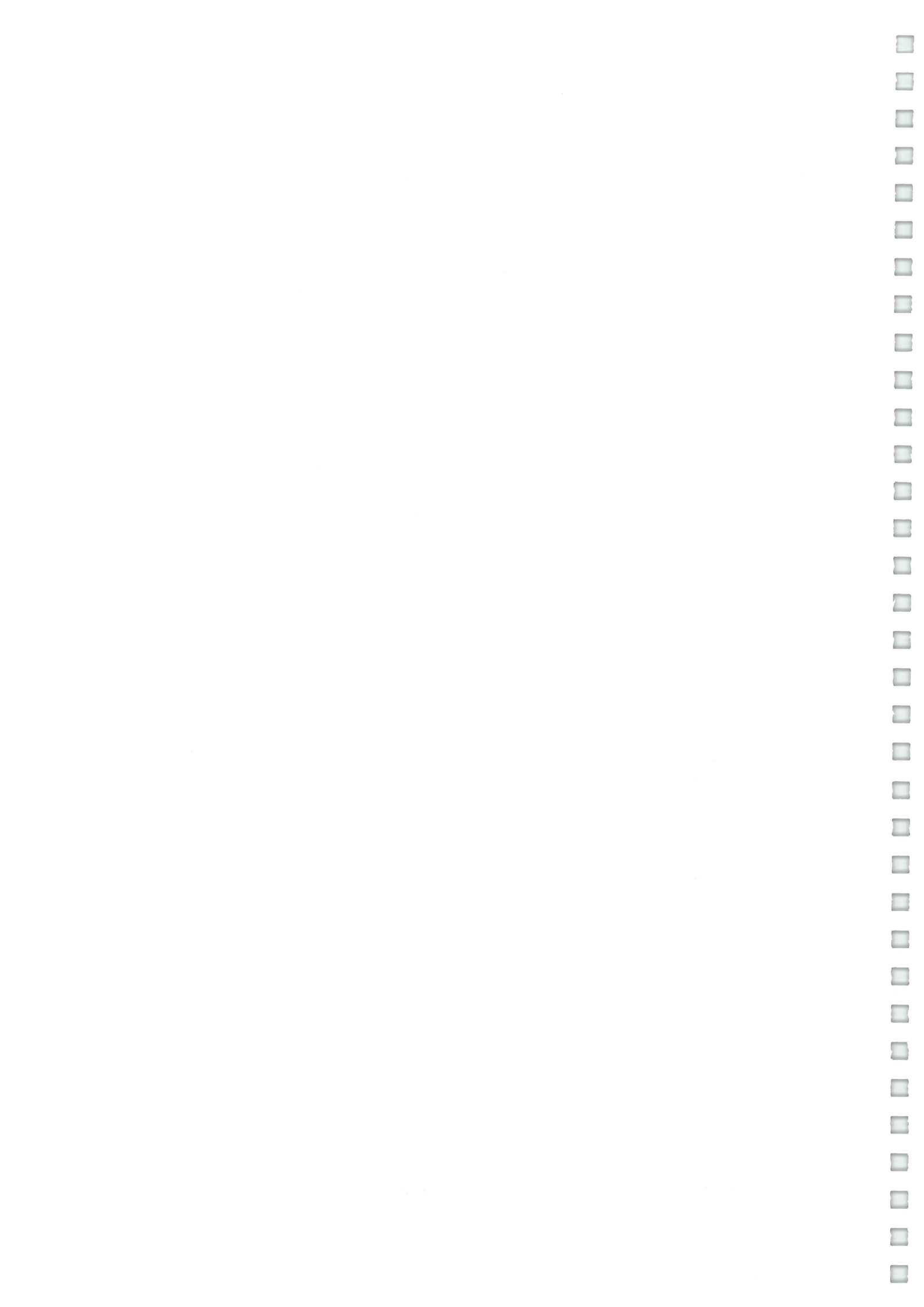


FIGURE 17 – Exemple de trace de frottement au sol laissée au sol par un piéton suite à une collision avec une voiture.





## 6.2 Trace de freinage élargie à proximité du point d'impact

Dans les collisions où le piéton est percuté au niveau des optiques avant d'un véhicule en freinage maxi (sans ABS), lorsque celui-ci s'enroule sur le capot et que l'épaule vient au contact, cela a pour effet de surcharger la roue avant du côté du choc. De ce fait, on peut observer un élargissement de la trace de freinage qui correspond au chargement ponctuel de la roue par le corps (*confer* FIG 18 page 31)

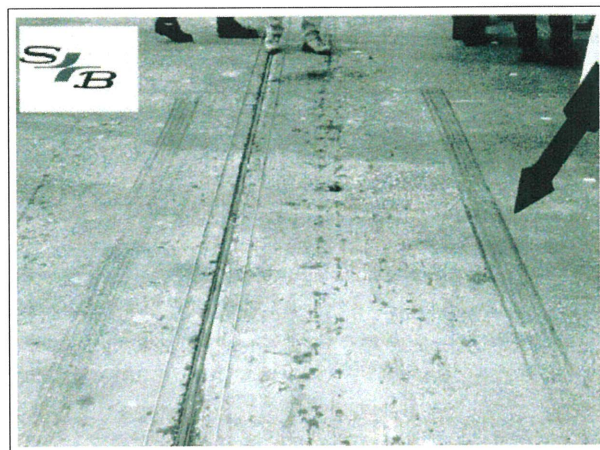


FIGURE 18 – Exemple de trace de freinage élargie lors d'une collision piéton vs voiture (illustration issue de [28]).

Les deux figures ci-dessous montrent la force normale sur les roues avant pour une collision voiture contre piéton, l'une centrée sur l'avant et l'autre au niveau du quart avant droit. Ces deux figures sont issues de simulations numériques réalisées avec PC CRASH avec :

- masse du piéton = 70 kg,
- masse de la voiture = 1 300 kg,
- vitesse d'impact = 58 km/h,
- $a = -8 \text{ m/s}^2$ .



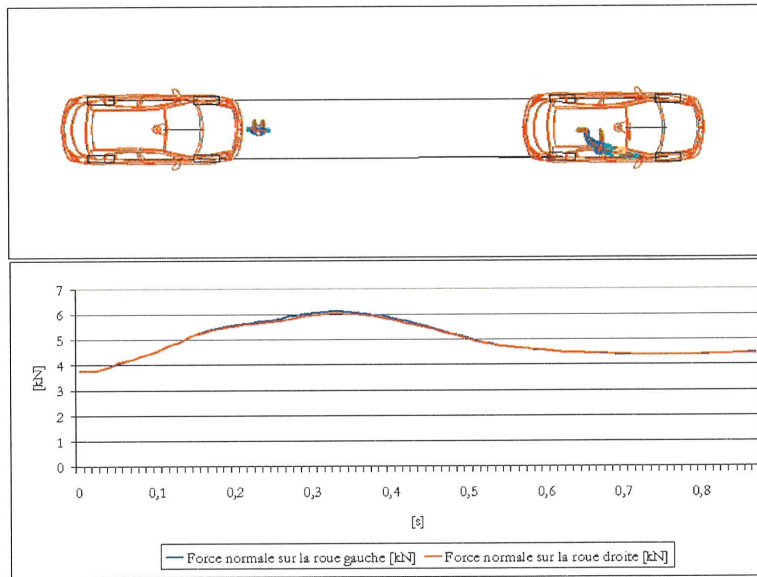


FIGURE 19 – Forces normales sur les roues avant d’un véhicule lors d’une collision centrée contre un piéton.

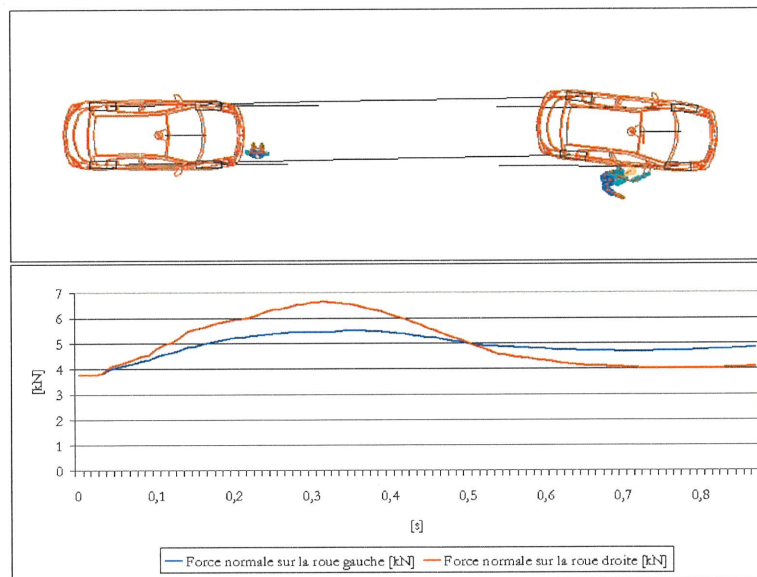


FIGURE 20 – Forces normales sur les roues avant d’un véhicule lors d’une collision excentrée contre un piéton.

L’analyse du diagramme FIG. 20 page 32 montre que lorsque le piéton est percuté sur le quart avant du véhicule, la roue avant droite supporte un poids plus important (environ 1 kN en plus) que l’autre roue. Ainsi, ce sur-poids sur la roue droite engendre un frottement



de gomme de pneumatique plus important au sol et donc une trace plus élargie.

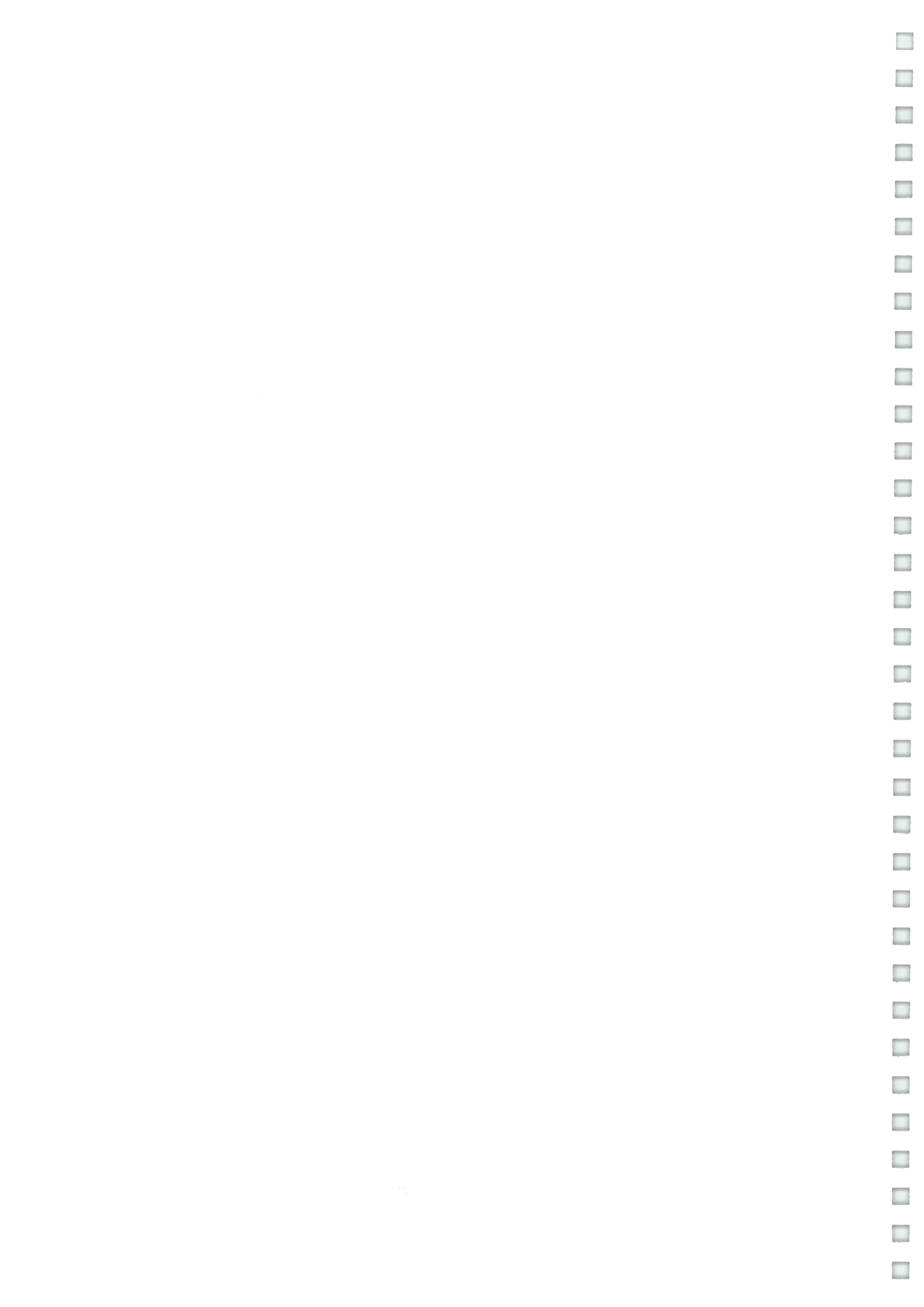
Le diagramme FIG. 19 page 32 montre effectivement que lorsque la collision est centrée, le poids rajouté par le corps du piéton lors de l'impact sur le capot est distribué de façon égale sur les deux roues.

La présence d'une trace de freinage élargie peut aider l'accidentologue à estimer la position du point de choc. Notons par ailleurs qu'il existe un décalage spatial entre le point de choc et l'élargissement de la trace de freinage du fait que ce dernier a lieu lorsque l'épaule entre en contact avec le capot. Les différents crash-tests ont montré globalement que l'impact de l'épaule a lieu entre 0.05 et 0.15 s<sup>1</sup> après l'impact primaire. Si l'on considère une vitesse d'impact de 60 km/h, le point d'impact sera donc situé entre 0.8 et 2.6 m en amont de l'élargissement de la trace.

---

1. Sur la FIG 21, on voit que l'épaule est proche du capot, 120 ms après le premier contact, ce qui confirme la valeur haute de 0.15 s.





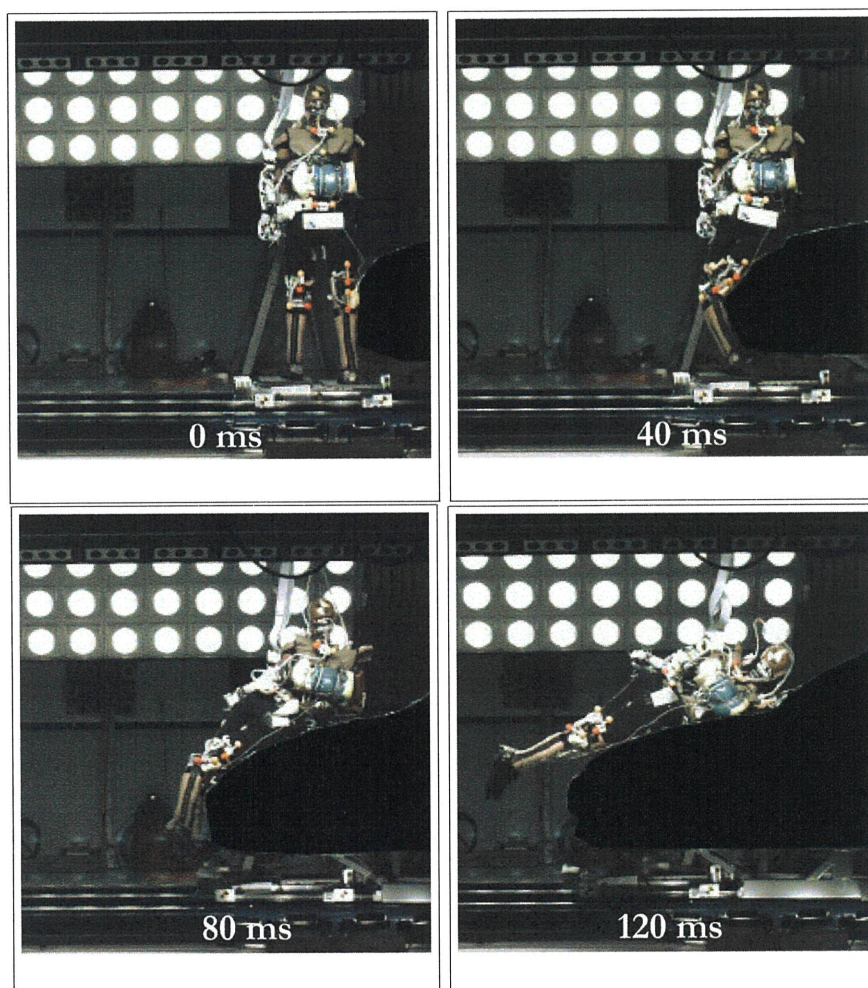


FIGURE 21 – Cinématique du corps d'un mannequin (POLAR II) ( $V=40$  km/h) issue d'expérimentation [35].

Polar II est un mannequin piéton créé par le constructeur automobile Honda en 1998 et capable de témoigner de blessures infligées à huit zones du corps humain.

### 6.3 Débris

Lors d'un impact entre un véhicule et piéton, différents types de débris peuvent être relevés :

- plastiques ou verres issus des optiques du véhicule,
- morceaux de miroir des rétroviseurs,
- verre du pare-prise et des vitres latérales.

Des études ont montré qu'il existait une corrélation entre la vitesse d'impact du véhicule et la distance de projection de ces débris, notamment celle réalisée par DETTINGER [7]. L'auteur



montre en particulier que les débris issus du verre du pare-brise et ceux des optiques sont positionnés dans la même zone de la chaussée bien que le pare-brise soit impacté environ 0.1 - 0.15 s après les optiques. Ce décalage temporel est du au fait que les optiques sont impactés en premier par le piéton alors que ce dernier doit s'“enrouler” ensuite pour atteindre le pare-brise. Pour localiser le point d'impact, il est important de bien déterminer le positionnement des premiers fragments de débris qui se situent en général non loin du point d'impact. La corrélation entre la vitesse d'impact et la distance de projection des débris du pare-brise et des optiques (premier débris et dernier débris) est donnée sur la FIG. 22 page 35.

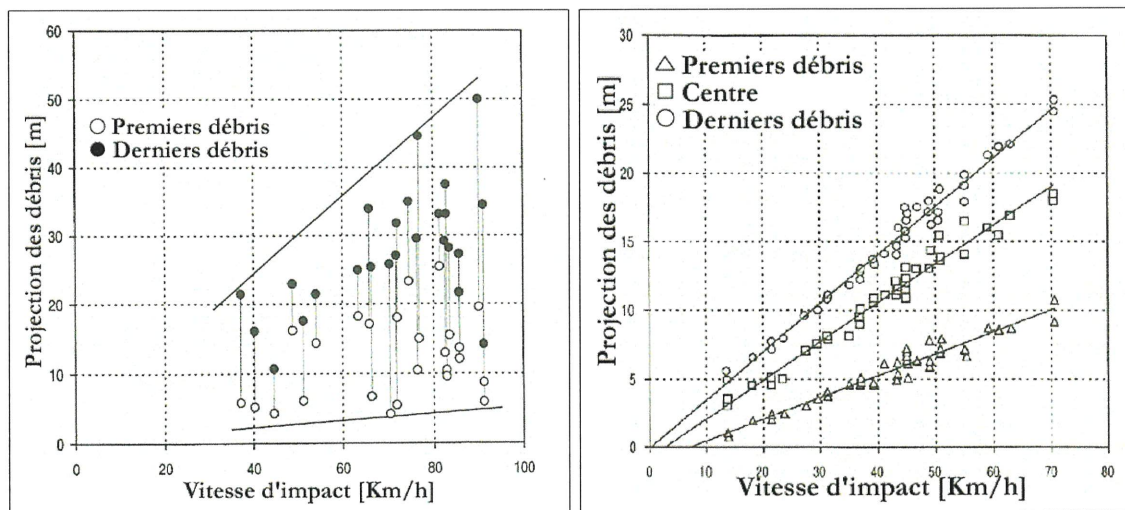


FIGURE 22 – Distance de projection des débris du pare-brise à gauche et des optiques à droite en fonction de la vitesse d'impact. Figures issue de [7] et[3].

## 6.4 Analyse graphique de la localisation du point d'impact

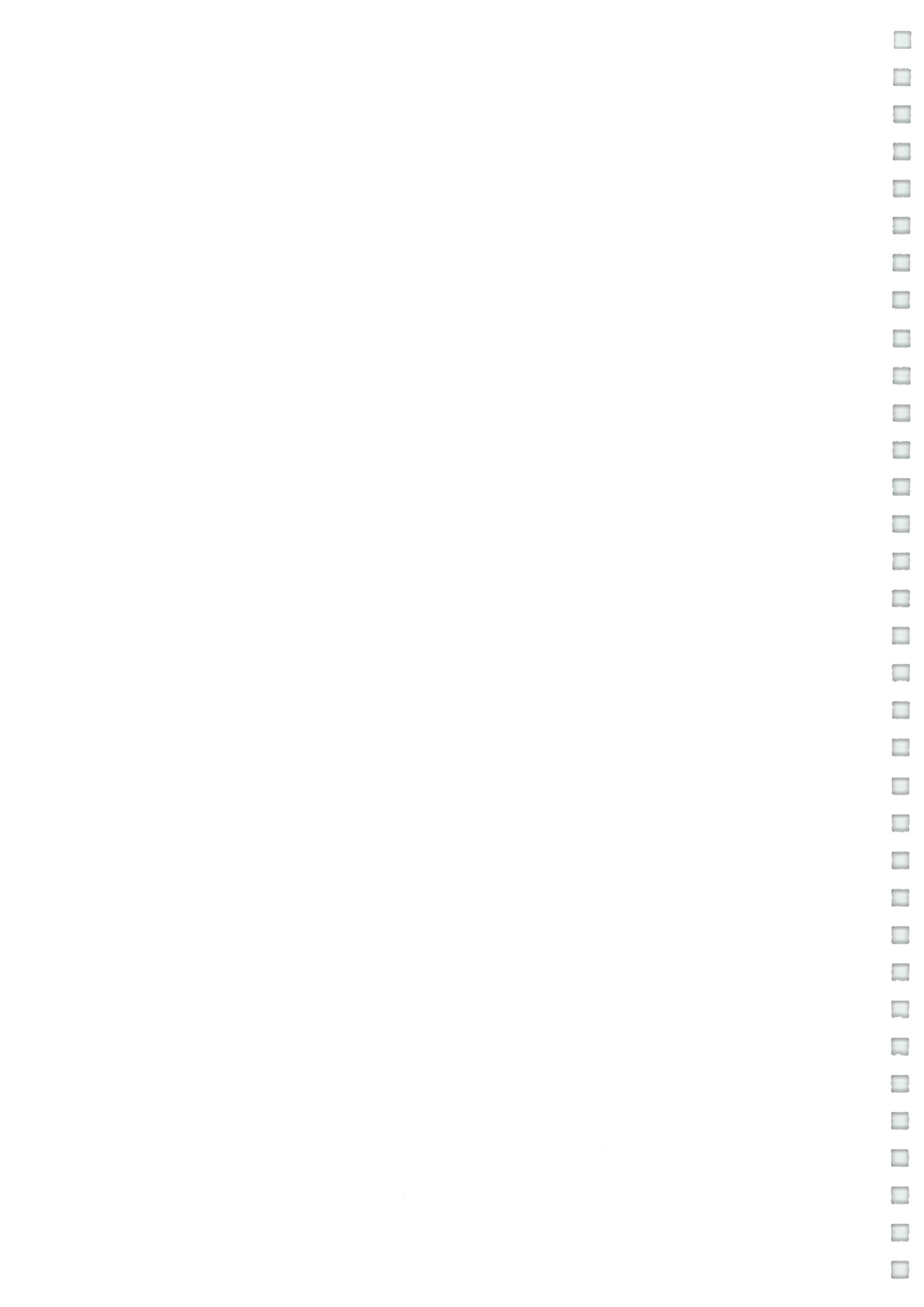
En 1980, KÜNHIL [17] développe une méthode axée sur l'analyse du point d'impact. Cette méthode prend en compte la décélération du véhicule, la distance de projection du piéton, et les débris laissés par le véhicule. Pour utiliser cette méthode, il faut au préalable connaître les positions résiduelles du véhicule, du piéton et la localisation des premiers et derniers débris. Ensuite, il conviendra de définir les limites des paramètres suivants :

- Corridor : il s'agit ici de borner le passage géométrique que le piéton emprunte en pré-collision (*e.g.* passage entre deux voitures, barrière, *etc...*) .
- Vitesse du véhicule : il s'agit de donner l'intervalle dans lequel se situe la vitesse d'impact du véhicule que l'on peut appréhender suivant plusieurs méthodes.

En utilisant :

- La parabole de freinage<sup>2</sup> du véhicule avec une décélération minimum et maximum,

2. Il est recommandé d'augmenter la vitesse calculée par la parabole de freinage en incluant la perte de



- La parabole de KÜNHEL (*confer* équation 36 page 59) avec la décélération minimum et maximum du véhicule,
- Les équations liant la distance de projection des premiers et derniers débris à la vitesse d'impact du véhicule (*confer* FIG. 22 page 35) avec une tolérance de  $\pm 5$  km/h.

On obtient un champs de solution localisant ainsi la zone d'impact (*confer* FIG. 23 page 36).

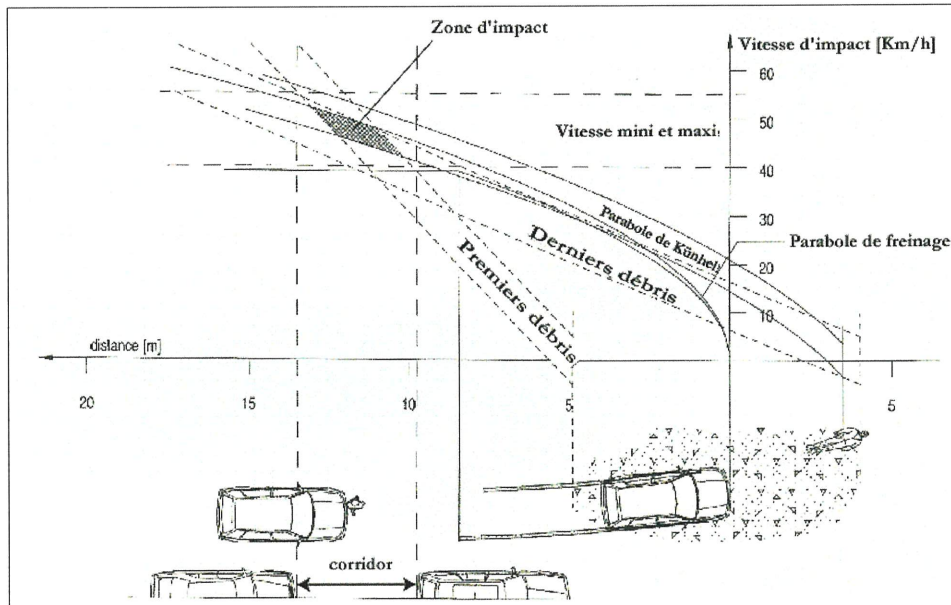


FIGURE 23 – Analyse du point d'impact

vitesse liée à l'impact (*confer* équation 3 page 46)





# Chapitre 7

## Caractéristiques biométriques des piétons impactés

Les caractéristiques anthropométriques du piéton et notamment la taille et le poids, sont des données très importantes voire indispensables pour le travail de reconstruction. En effet, il a été montré que :

- la taille a une influence sur la localisation de l'impact tête sur le véhicule et aussi sur la trajectoire post-impact.
- le poids est une donnée décisive lorsque l'on souhaite calculer la perte de vitesse du véhicule qui percute le piéton (*confer* paragraphe 9.1.1).

Par ailleurs, dans les simulations numériques utilisant une modélisation du piéton en élément de type multi-corps, les données que sont la taille et le poids sont primordiales si l'on veut assoir une cohérence scientifique des résultats. Par conséquent, lors des investigations sur les accidents, il est fondamental de demander ces deux paramètres à l'impliqué. En cas d'impossibilité (*e.g.* accident mortel, *etc...*), il peut être utile de se référer à des abaques donnant la taille et le poids d'un individu suivant l'âge et le sexe.

### 7.1 Poids et Taille des adultes

En ce qui concerne les adultes, nous utiliserons une enquête réalisée en 1982 par REBIFFÉ et al [25] en France Métropolitaine sur 3 252 personnes (1 665 hommes et 1 587 femmes). Sur chaque personne, différentes mesures ont été relevées dont la taille et le poids, les tableaux ci-dessous présentant ces deux données par sexe et classes d'âge.



Classes d'âges	Taille			Poids		
	5%	50%	95%	5%	50%	95%
18-24 ans	164.9	173.5	183.9	55.5	67.7	84.7
25-34 ans	163.0	173.8	184.5	58.2	72.5	91.8
35-44 ans	161.1	172.1	184.1	60.3	74.4	94.6
45-54 ans	159.8	170.0	180.2	58.7	75.2	96.2
55 ans et plus	157.3	169.4	179.5	58.3	76.5	98.2
Total	160.7	171.9	183	58.2	73.2	94.6

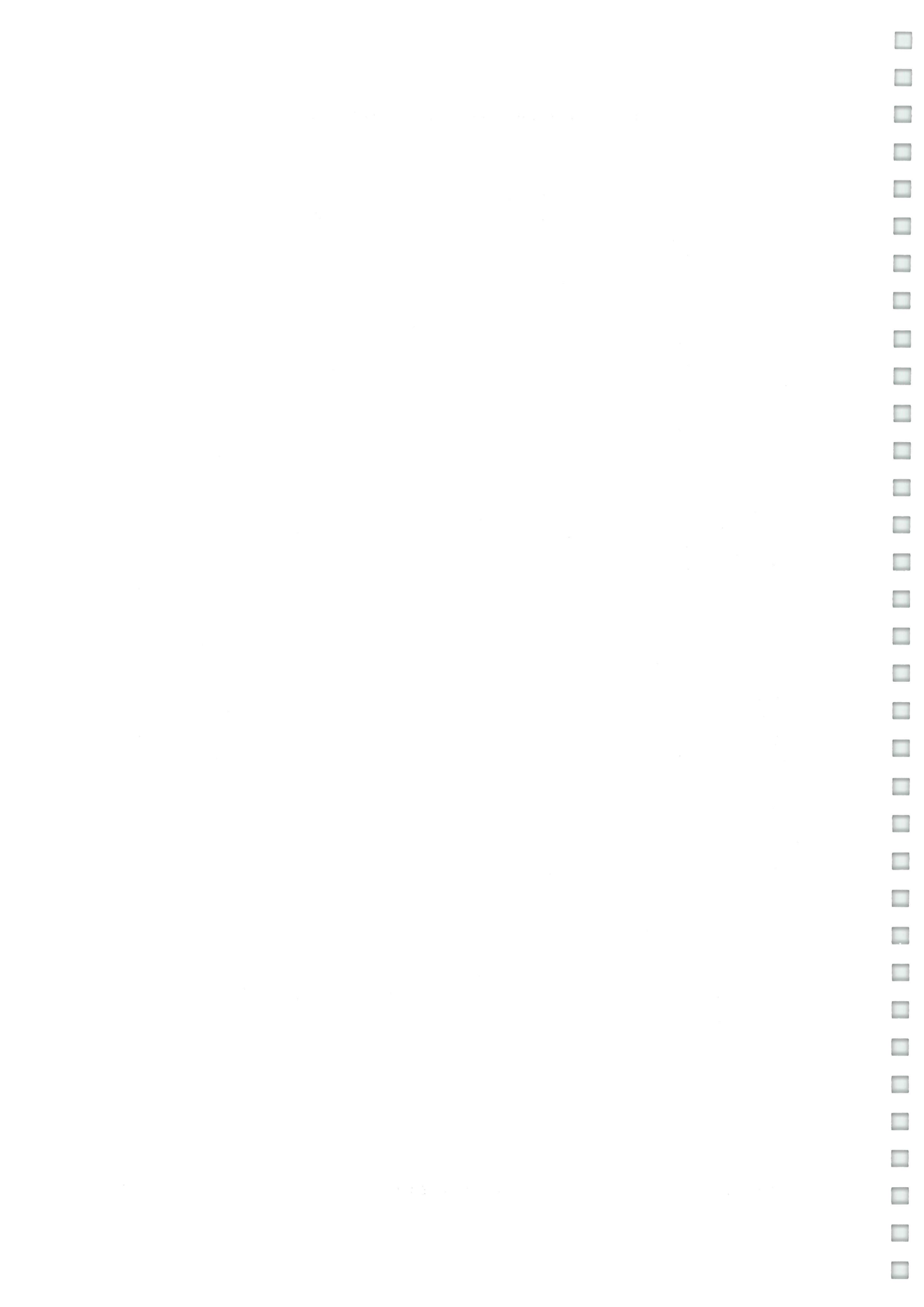
TABLE 2 – Taille et Poids des hommes par tranches d'âge issus de [25] au 5<sup>ième</sup>, 50<sup>ième</sup> et 95<sup>ième</sup> centiles (TAILLE : moyenne : 171.6 cm et  $\sigma=6.8$  cm) (POIDS : moyenne : 74.1 kg et  $\sigma=11$  kg).

Classes d'âges	Taille			Poids		
	5%	50%	95%	5%	50%	95%
18-24 ans	152.5	162.1	171.3	44.2	55.0	70.8
25-34 ans	151.2	161.1	170.9	45.32	56.5	75.2
35-44 ans	150.6	160.4	170.3	47.9	58.8	78.4
45-54 ans	148.5	157.5	167.8	49.4	61.4	84.7
55 ans et plus	150.6	158.4	168.1	51.1	63.5	79.8
Total	150.7	160.4	170.5	46.5	58.0	78.0

TABLE 3 – Taille et Poids des femmes par tranches d'âge issus de [25] au 5<sup>ième</sup>, 50<sup>ième</sup> et 95<sup>ième</sup> centiles (TAILLE : moyenne : 160.2 cm et  $\sigma=6.1$  cm) (POIDS : moyenne : 59.5 kg et  $\sigma=10$  kg) .

## 7.2 Poids et Taille des enfants

Concernant la population de filles et garçons âgés de 0 à 18 ans, nous nous appuyerons sur les données issues du livre **Pratique Médico-légale** écrit par DURIGON [8].



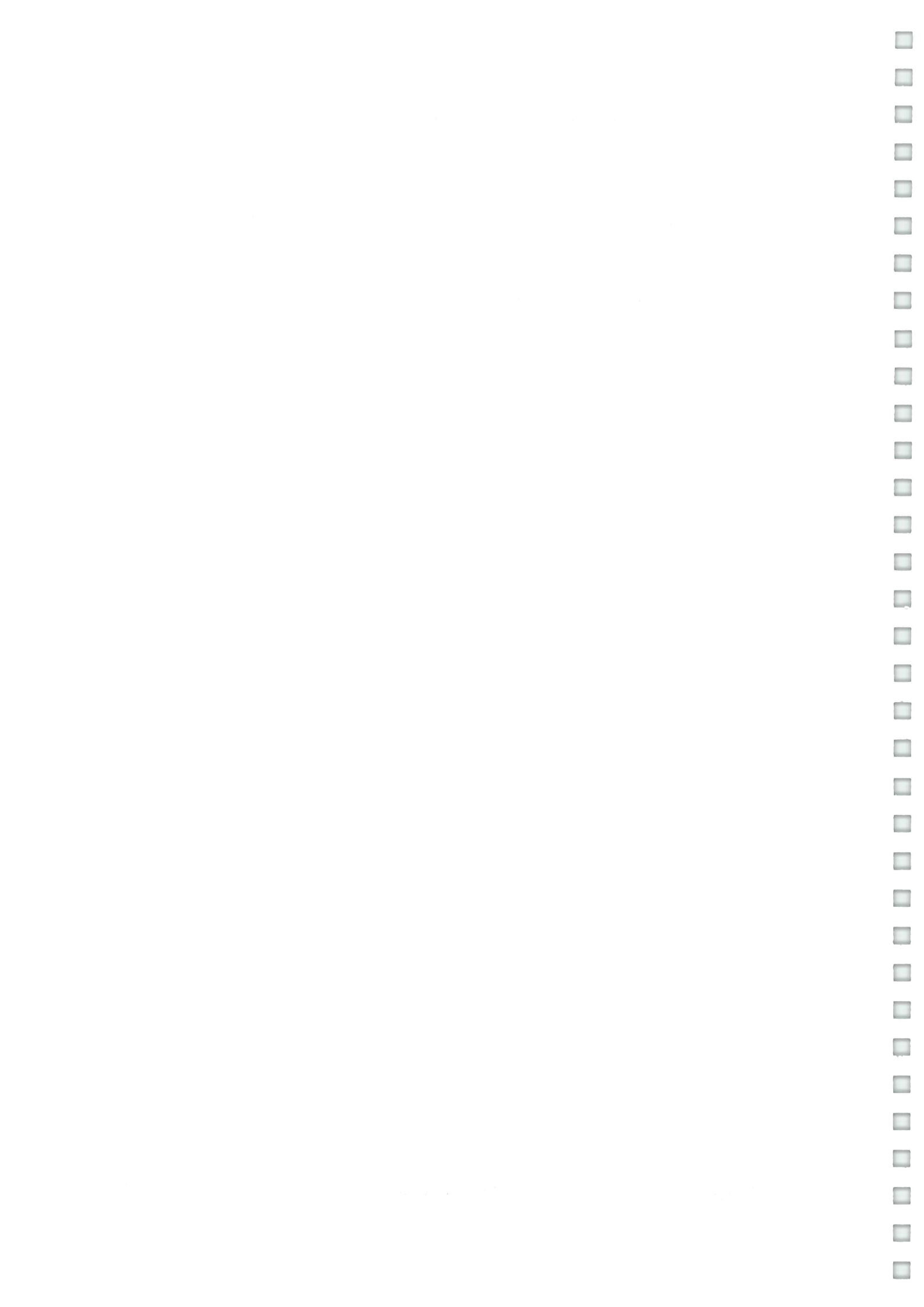
Filles					Garçons				
Âge	Taille [cm]		Poids [kg]		Âge	Taille [cm]		Poids [kg]	
	Moyenne	$\sigma$	Moyenne	$\sigma$		Moyenne	$\sigma$	Moyenne	$\sigma$
1 mois	52	2	3.7	0.38	1 mois	53	2	4	0.38
2 mois	56	2	4.6	0.38	2 mois	57	2	4.9	0.4
3 mois	59	2	5.3	0.4	3 mois	60	2.2	5.8	0.5
4 mois	61	2	6	0.5	4 mois	62.5	2.2	6.6	0.5
5 mois	63	2.2	6.5	0.5	5 mois	64.5	2.2	7	0.5
6 mois	65	2.2	7	0.6	6 mois	66.5	2.2	7.6	0.6
7 mois	65.5	2.2	7.5	0.6	7 mois	68	2.3	8	0.6
8 mois	68	2.2	8	0.7	8 mois	69.5	2.3	8.5	0.7
9 mois	69	2.3	8.5	0.7	9 mois	71	2.3	8.9	0.7
10 mois	70	2.3	8.7	0.7	10 mois	72	2.3	9.2	0.7
11 mois	71.5	2.3	9	0.7	11 mois	73	2.4	9.5	0.8
1 an	73	2.5	9.2	0.7	1 an	74	2.4	9.8	0.8
2 ans	84	3	11.6	0.9	2 ans	86	3	12	0.9
3 ans	93	3	13.5	1	3 ans	94	3.5	14	0.9
4 ans	100	3.5	15.5	1.1	4 ans	101	4	16	1.1
5 ans	106	4	17	1.1	5 ans	108	4	17.8	1.2
6 ans	112	4	19	1.5	6 ans	114	4.5	19.9	1.2
7 ans	118	4.5	21	1.5	7 ans	120	5	22.2	1.5
8 ans	124	4.5	24	2	8 ans	125	5	24.7	2
9 ans	129	5	26	2	9 ans	131	5	27.4	2
10 ans	134	5	30	3	10 ans	135	5	30.3	2.6
11 ans	141	5	33	3	11 ans	140	5.6	33.3	3.2
12 ans	147	6	38	4	12 ans	146	6	36.7	3.8
13 ans	154	6	43	5	13 ans	152	7	41.6	4.4
14 ans	159	6	48	5.7	14 ans	160	8	47.7	5
15 ans	161	6	51	5.7	15 ans	167	8	54	5.8
16 ans	162	6	52	5.7	16 ans	171	6.5	58.4	6
17 ans	163	6	52.5	5.7	17 ans	173	6	61.3	6.4
18 ans	163	6	52.5	5.7	18 ans	175	6	63.3	6.4

TABLE 4 – Mensurations en fonction de l'âge chez les filles et les garçons.

**Nota Bene :** La masse augmente proportionnellement avec le carré de la taille. L'indice de masse corporel<sup>1</sup> qui est égal au poids divisé par le carré de la taille est d'environ de 15-20 pour un enfant et 18-25 pour un adulte de corpulence normale.

1.  $IMC = \frac{poids}{taille^2}$  [kg.m<sup>-2</sup>]





### 7.3 Hauteur du centre de gravité du corps

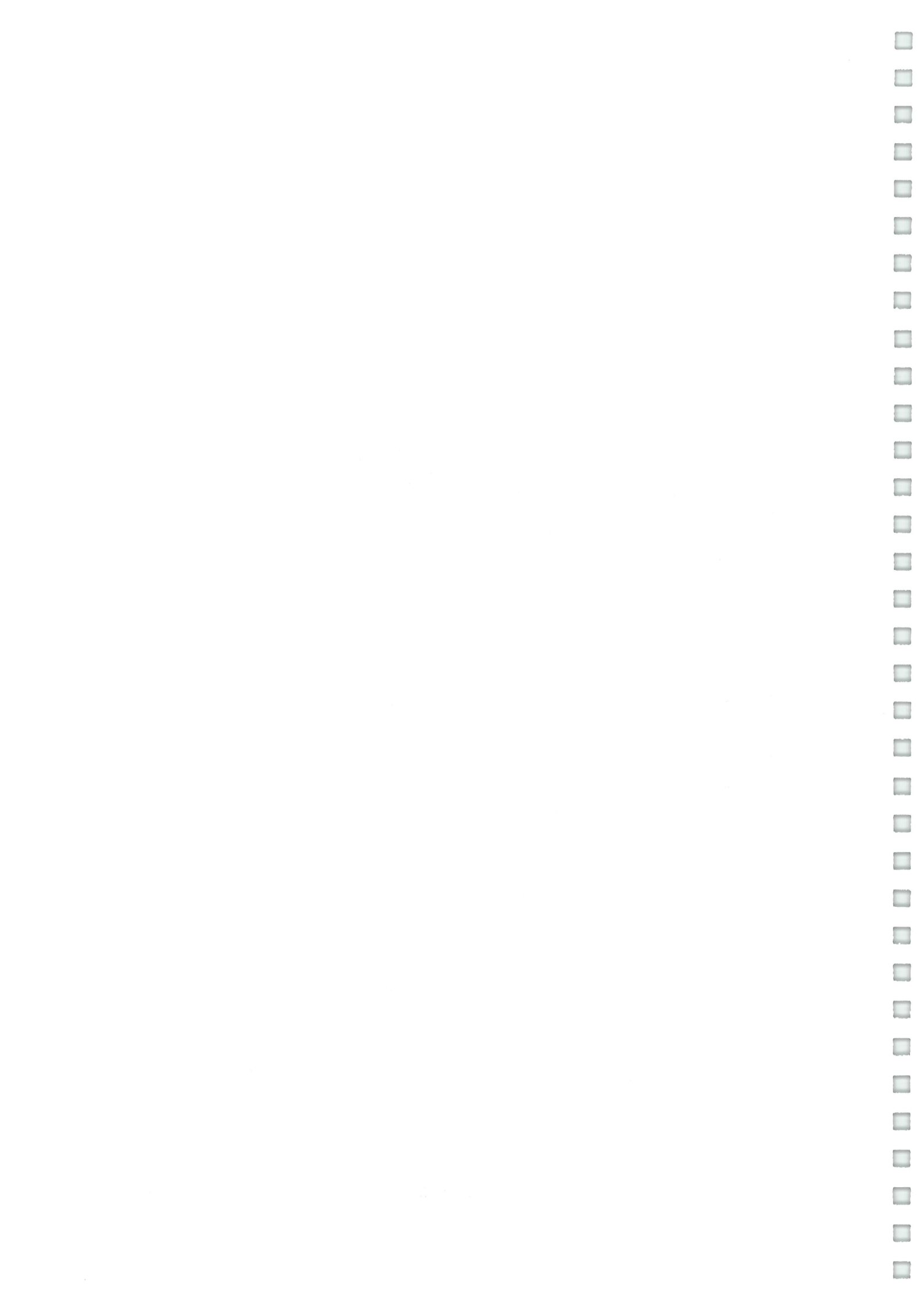
Comme nous l'avons vu plus haut dans le document, la rotation du piéton est fortement conditionnée par la différence verticale entre la hauteur du point de contact initial véhicule/piéton et la hauteur du CG du piéton. De ce fait, il est important de connaître la hauteur du CG lorsque l'on s'intéresse à l'analyse préliminaire du mécanisme de choc et de la trajectoire post-impact du piéton. Selon WINTER [47], la hauteur moyenne du centre de gravité d'un corps est égale à environ 55 % de la taille de ce dernier. Par ailleurs, le même auteur précise que la hauteur du centre de gravité d'un corps se situe en moyenne à 3 cm en-dessous de l'ombilic.



# Chapitre 8

## Vitesse du piéton

La vitesse de déplacement du piéton est un autre paramètre très important dans la reconstruction, aussi bien au niveau de la cinématique d'impact que de l'analyse de la pré-collision. La plupart du temps la vitesse du piéton est déterminée ou appréhendée *via* le récit de témoins de l'accident. Cependant, ces témoignages souvent contradictoires tendent à montrer que l'appréciation de la vitesse est très subjective et par conséquent entourée d'erreurs. Ainsi, lorsque des enfants sont témoins d'un accident, ils emploient régulièrement le terme "rapide" à mauvaise escient face au fait accidentel devant lequel ils tendent, somme toute, à exagérer et maximiser certains paramètres dont la vitesse. De même, la position du témoin au moment des faits a une influence cruciale : *e.g.* un témoin direct situé juste devant l'accident aura la plupart du temps une mauvaise appréciation comparativement à un autre témoin qui voit la scène complète car situé plus loin. Un piéton courant pour traverser la route, et se faisant renverser, aura tendance à dire pour se protéger, qu'il ne courait pas mais marchait normalement alors que le conducteur du véhicule impliqué affirmera qu'il a vu l'usager vulnérable courir et n'a pas eu par conséquent le temps nécessaire pour réagir devant le danger. La vérité sur les faits reste parfois très complexe à identifier, particulièrement lorsqu'il s'agit d'un accident mortel où le déroulement reste parfois ésotérique. De ce fait, pour palier à ces défauts, il convient de faire une analyse Distance-Temps pour apporter une cohérence dans la reconstitution des événements accidentels. Pour ce faire, un abaque donnant les vitesses des piétons suivant l'âge et le sexe peut être d'un grand secours. Dans la littérature, les travaux de EBERHARDT et al [9] sont très intéressants puisqu'ils donnent la vitesse d'un piéton suivant le sexe, l'âge et selon 4 modes de déplacements (marche, marche rapide, jogging et course) (*confer* FIG. 24 et 25 page 42).



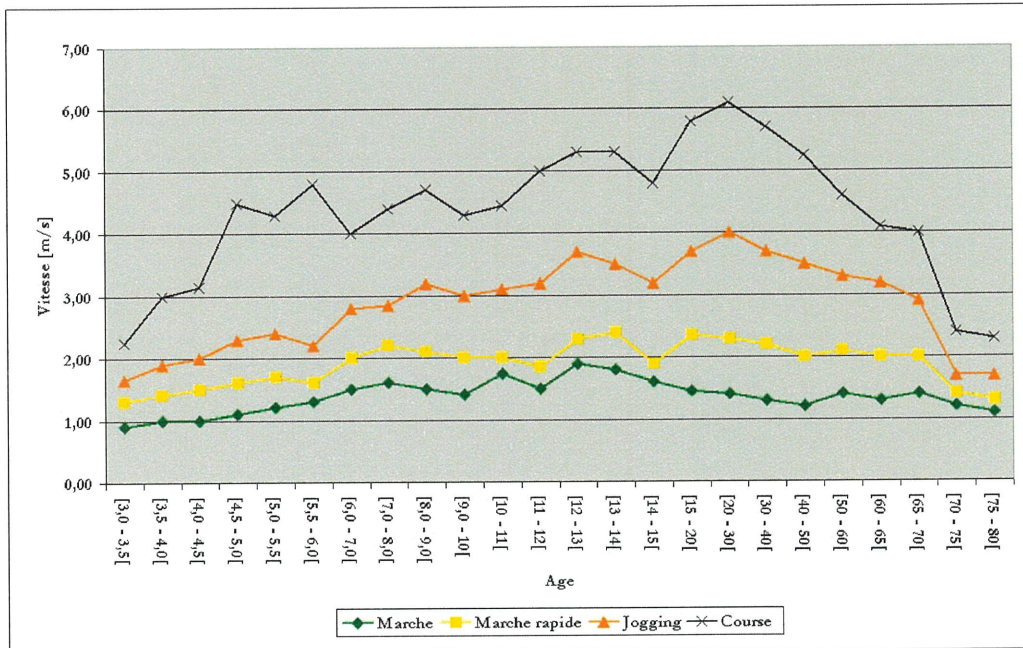


FIGURE 24 – Vitesse de déplacement des piétons - Femmes [9].

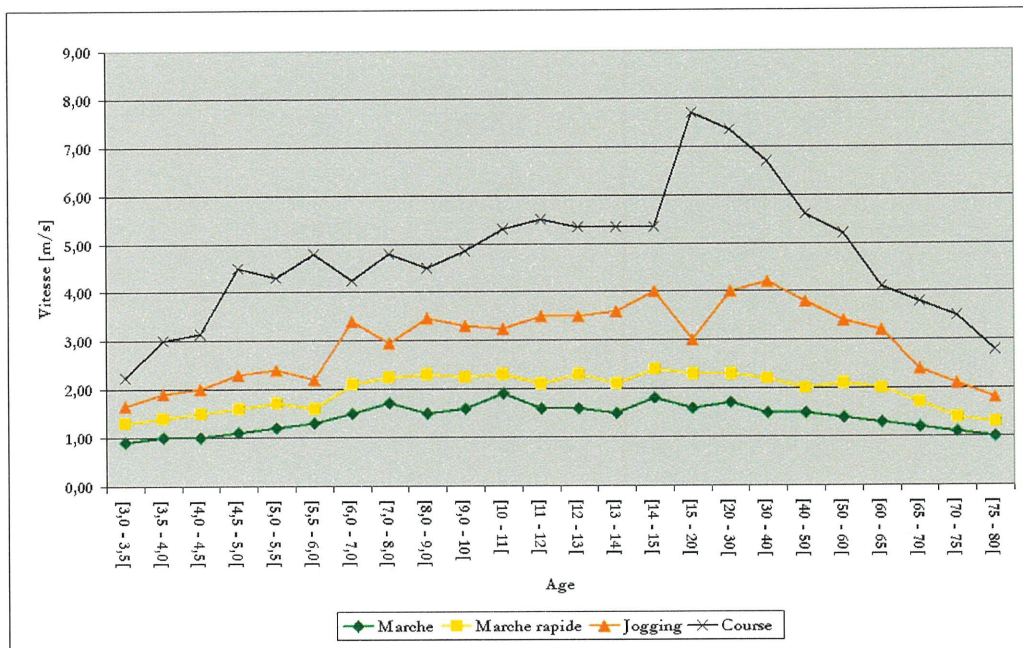
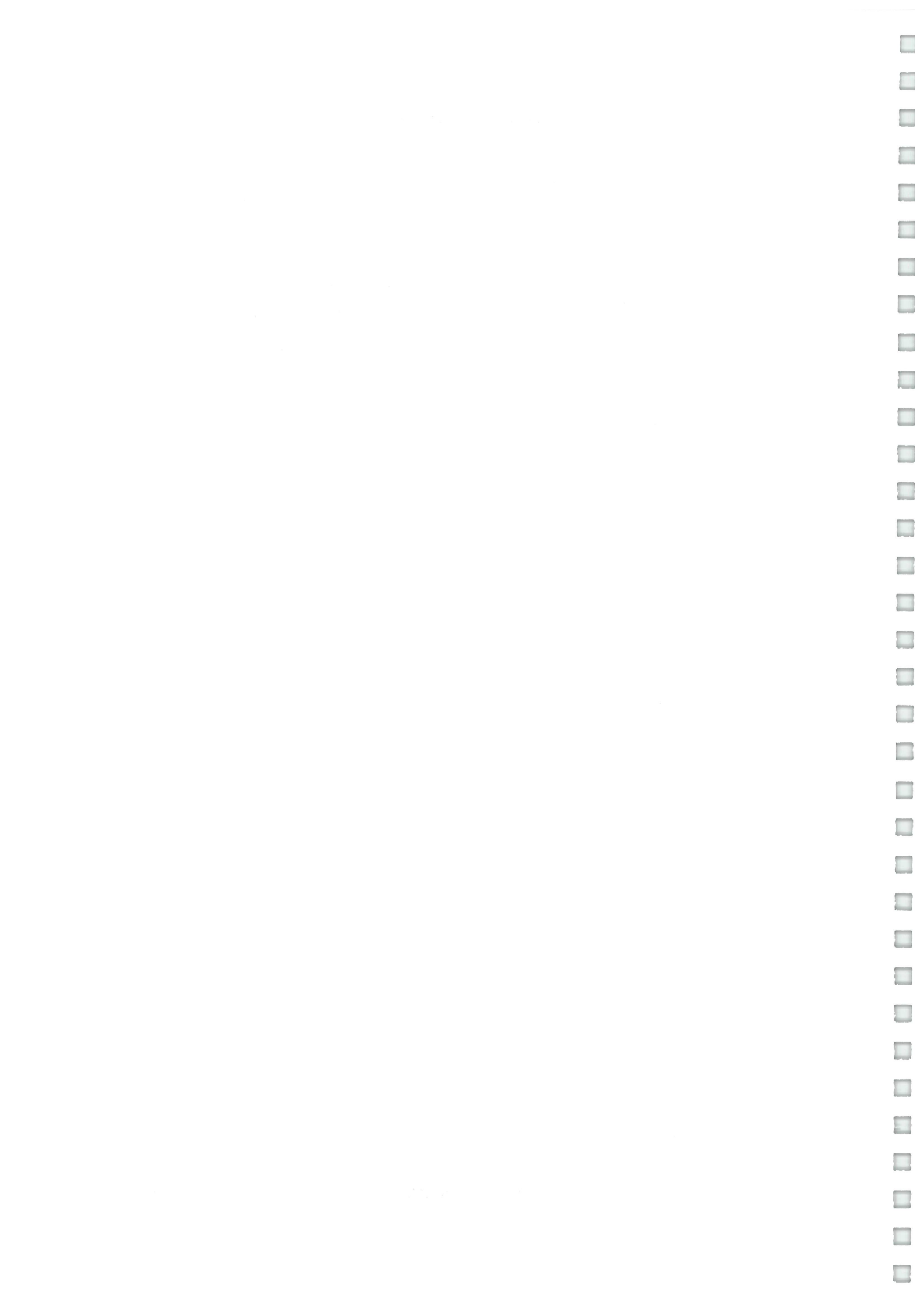


FIGURE 25 – Vitesse de déplacement des piétons - Hommes [9].





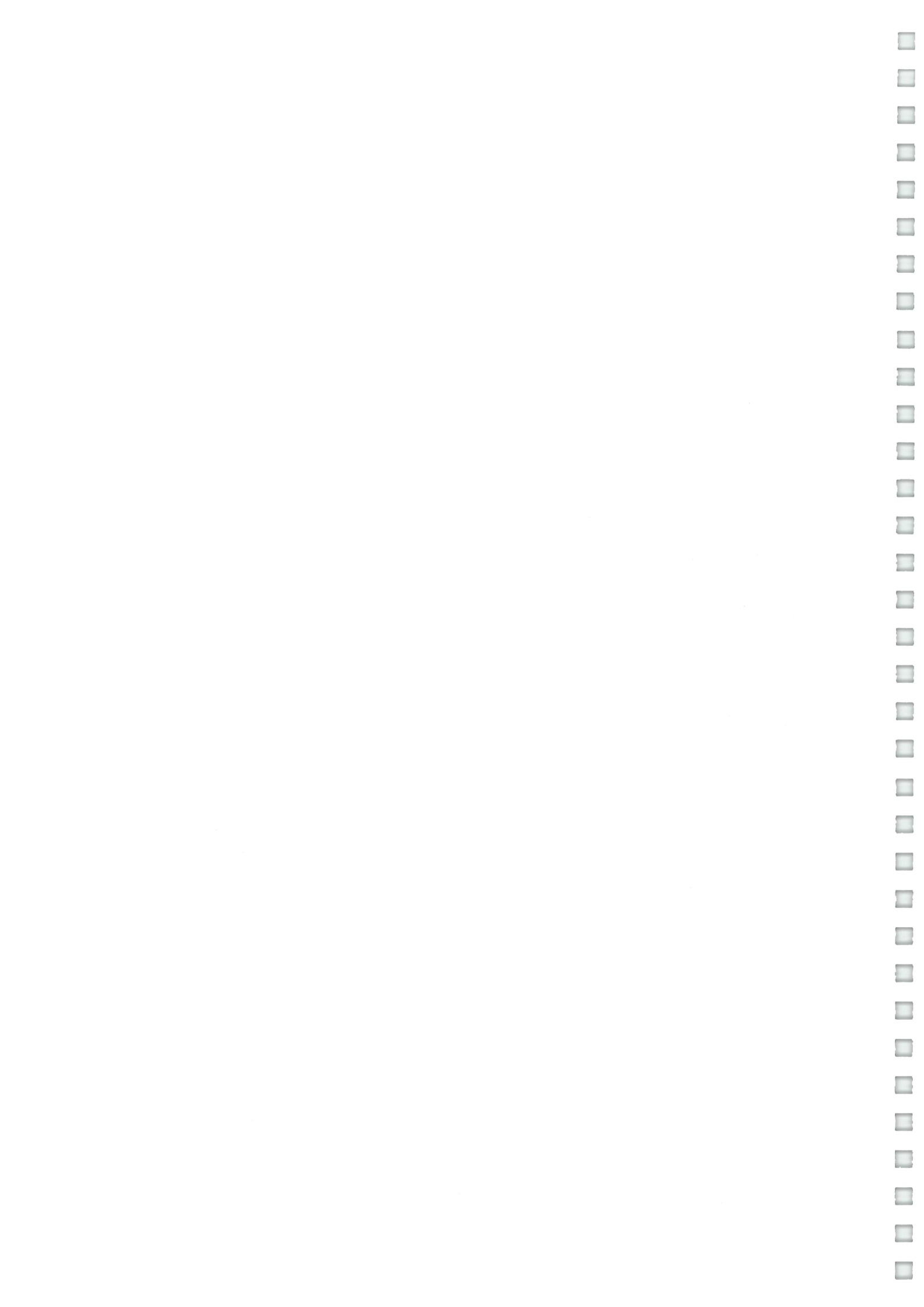
Dans un papier présenté au 16<sup>ème</sup> congrès EVU<sup>1</sup>, WINDISCH [46] reprend les travaux de EBERHARDT et donne à partir d'analyses vidéo, une évaluation statistique de la vitesse d'un enfant âgé de 2 à 3 ans (*confer* TABLE. 5) .

Type de déplacement	Plage de vitesse
Marche	0.4 m/s
Marche rapide	0.4 - 0.9 m/s
Jogging	0.9 - 1.4 m/s
Course	1.9 m/s

TABLE 5 – Vitesse de déplacement d'un enfant âgé de 2-3 ans [46].

---

1. Europäischen Vereins für Unfallforschung und Unfallanalyse e.V. (European Association for Accident Research Accident Analysis).



# Chapitre 9

## Méthodes de détermination des vitesses

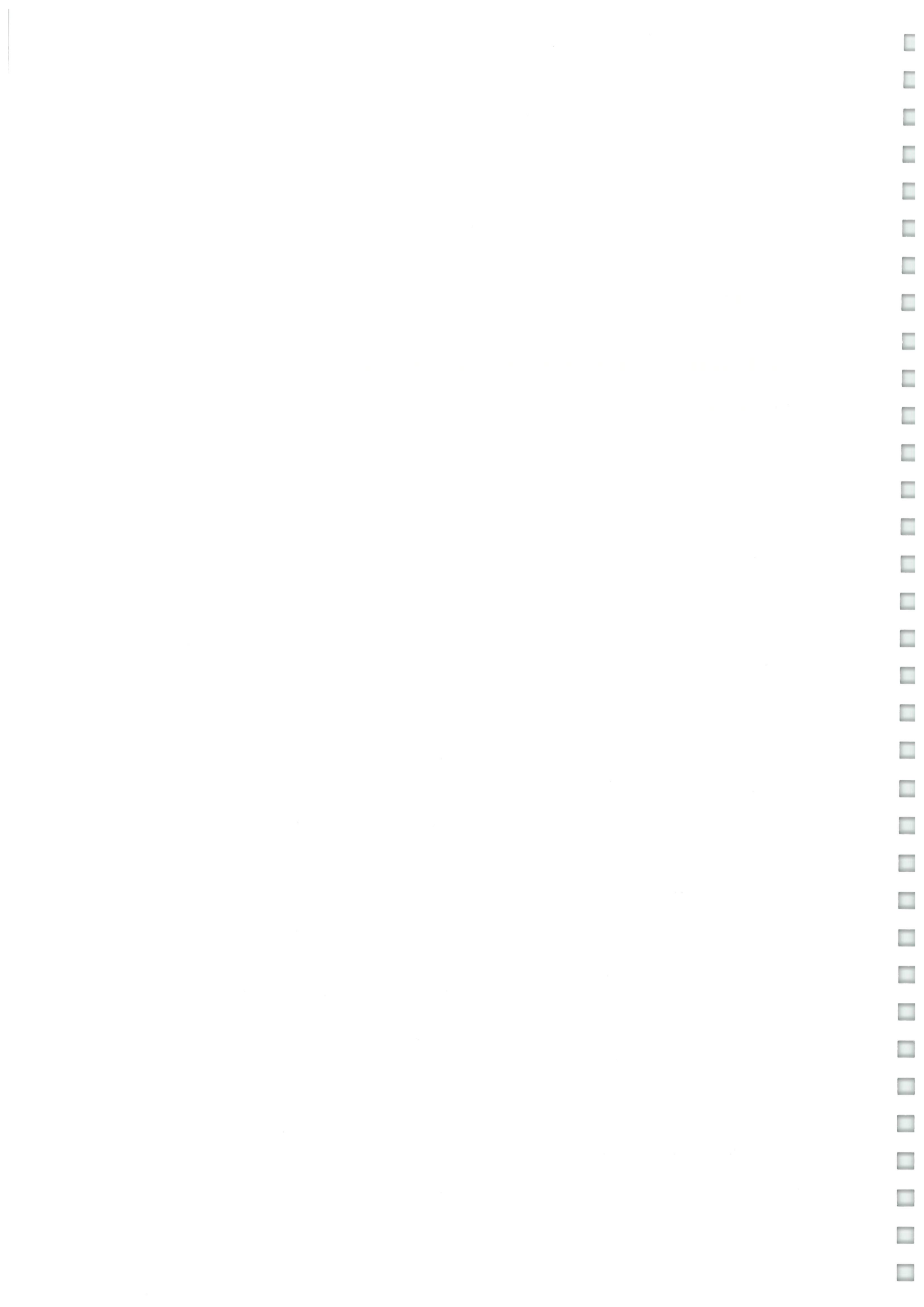
Ce chapitre traite de la détermination de la vitesse d'impact du véhicule. Lorsque des traces de freinage ont pu être relevées, la méthode utilisant la conservation de la quantité de mouvement sera à utiliser en priorité (paragraphe 9.1). En l'absence de traces, l'accidentologue pourra se référer aux modélisations analytiques simples développées au paragraphe 9.2, utilisant la distance longitudinale de projection du piéton. Nous présenterons ensuite au paragraphe 9.3, des modélisations empiriques et empirico-statistiques qui peuvent apporter une aide supplémentaire à l'accidentologue. Enfin, nous présenterons le logiciel de simulation numérique PC CRASH au paragraphe 9.4 et notamment le module multicorps dont nous nous servirons pour valider la vitesse d'impact.

### 9.1 Méthodes utilisant la conservation de la quantité de mouvement

#### 9.1.1 Utilisation de la conservation de la quantité de mouvement

Étant donné que la masse du piéton est très différente de celle du véhicule, la perte de vitesse du véhicule ( $\Delta V$ ) due à la collision est très faible. Cependant, si l'on désire faire un calcul précis, cette perte de vitesse doit être prise en compte et peut être approchée de façon simple par l'utilisation de la conservation de la quantité de mouvement.

Si le véhicule est en situation de freinage maximum au moment de la collision avec le piéton, sa vitesse de sortie de choc peut être calculée en utilisant un mouvement uniformément décéléré sur la distance de freinage.



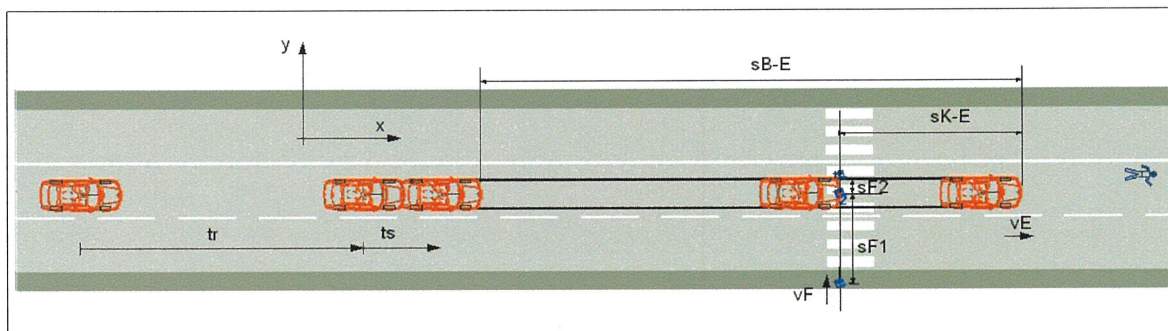


FIGURE 26 – Modélisation cinématique simple d'une collision voiture contre piéton.

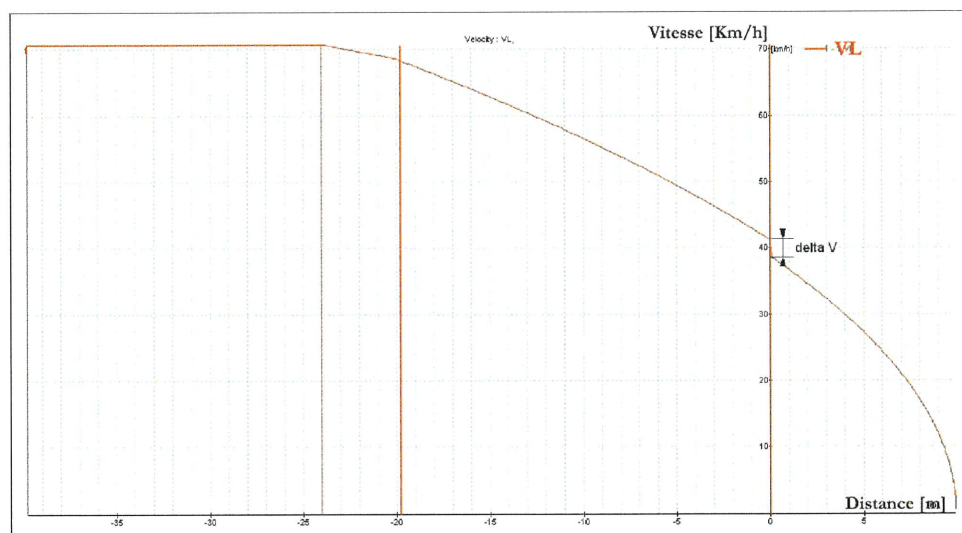


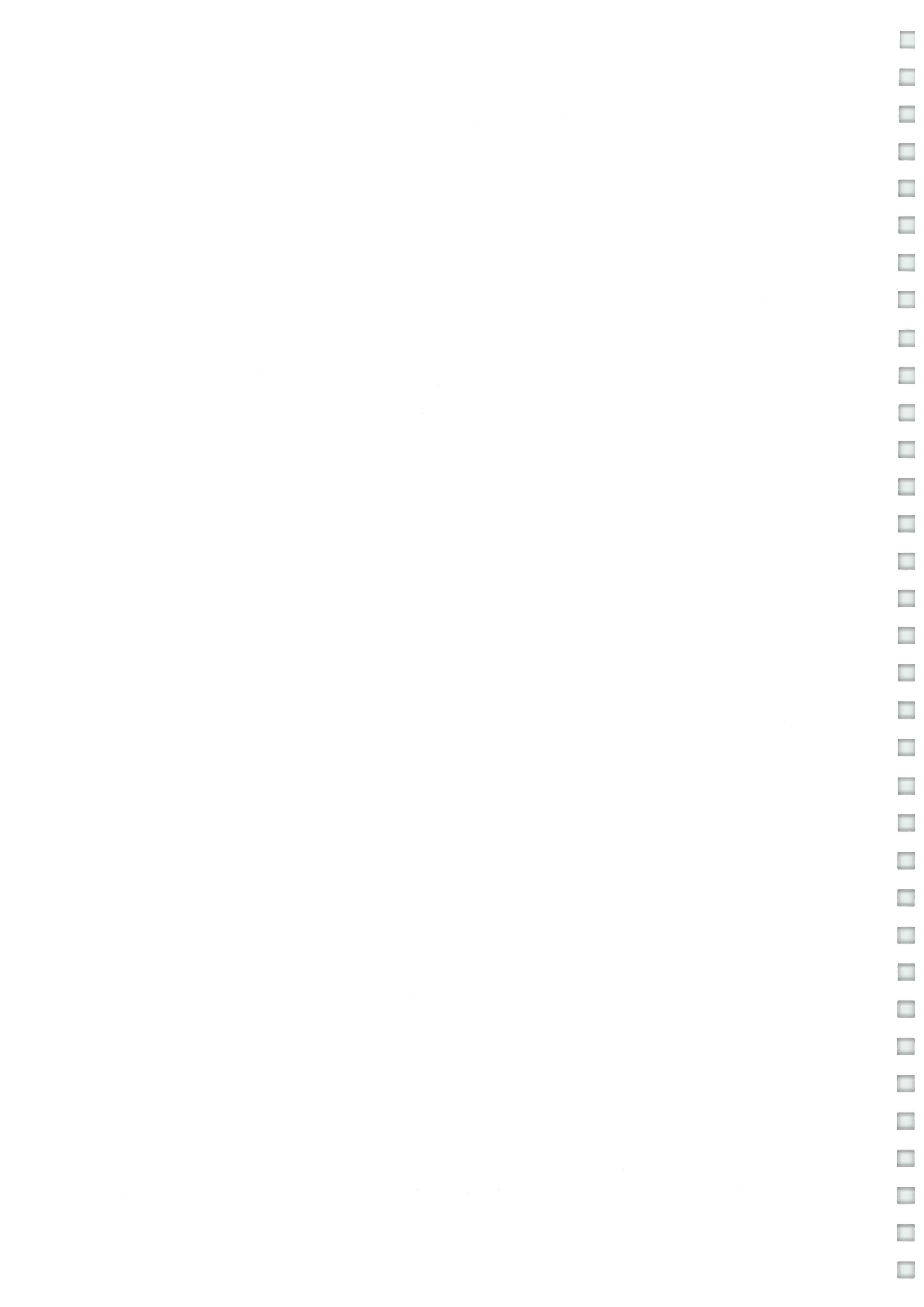
FIGURE 27 – Variation de vitesse du véhicule liée à un choc contre un piéton

Dans la suite de ce paragraphe, nous utiliserons les terminologies suivantes<sup>1</sup> :

- $V_E$  : Vitesse finale du véhicule sur la distance considérée (typiquement  $V_E = 0$ ) [m/s],
- $a_m$  : Décélération moyenne du véhicule appliquée sur la distance  $s_{B-E}$  [m/s<sup>2</sup>],
- $s_{B-E}$  : Distance totale de freinage [m],
- $s_{K-E}$  : Distance entre le point d'impact et la position résiduelle de la voiture [m],
- $t_r$  : Temps de réaction du conducteur du véhicule [s],
- $t_s$  : Temps de mise en pression du système de freinage [s],
- $t_B$  : Temps écoulé de puis le début du freinage jusqu'au point de choc [s],
- $IF$  : Facteur d'Impact (pas d'unité) défini page 47,

1. Nous avons repris au maximum les notations de la fenêtre de calcul PC CRASH version 8.2 (Dynamics / Kinematic Calculations / Pedestrian) afin de faciliter la compréhension de l'ensemble des paramètres pour les utilisateurs du programme.





$s_{F1}$  : Distance parcourue par le piéton depuis le début de traversée jusqu'à la position de choc [m],  
 $s_{F2}$  : Distance nécessaire au piéton pour quitter la zone de danger [m],  
 $V_F$  : Vitesse du piéton [m/s],  
 $V_P$  : Vitesse du piéton après choc (vitesse de projection) [m/s],  
 $V_R$  : Vitesse du véhicule au début du temps de réaction [m/s],  
 $V_B$  : Vitesse du véhicule au début du freinage effectif [m/s],  
 $V_c$  : Vitesse d'impact du véhicule [m/s],  
 $V'_c$  : Vitesse de sortie de choc du véhicule [km/h],  
 $\Delta V$  : Variation de vitesse du véhicule due à la collision avec le piéton [m/s],  
 $s_r$  : Distance parcourue par le véhicule pendant le temps de réaction [m],  
 $s_s$  : Distance parcourue par le véhicule pendant la mise en pression [m],  
 $s_{R-K}$  : Distance parcourue par le véhicule depuis le début du temps de réaction jusqu'au choc (*i.e.*  $s_{R-K} = s_r + s_s + s_{B-E} - s_{K-E} = s_r + s_s + s_B$ ) [m],  
 $s_B$  : Distance parcourue par le véhicule depuis le début du freinage effectif jusqu'au point de choc [m],  
 $t_{R-K}$  : Temps écoulé depuis le début du temps de réaction jusqu'au choc [s],  
 $m_{VL}$  : Masse du véhicule léger [kg],  
 $m_P$  : Masse du piéton [kg].

#### 9.1.1.1 Cas perpendiculaire

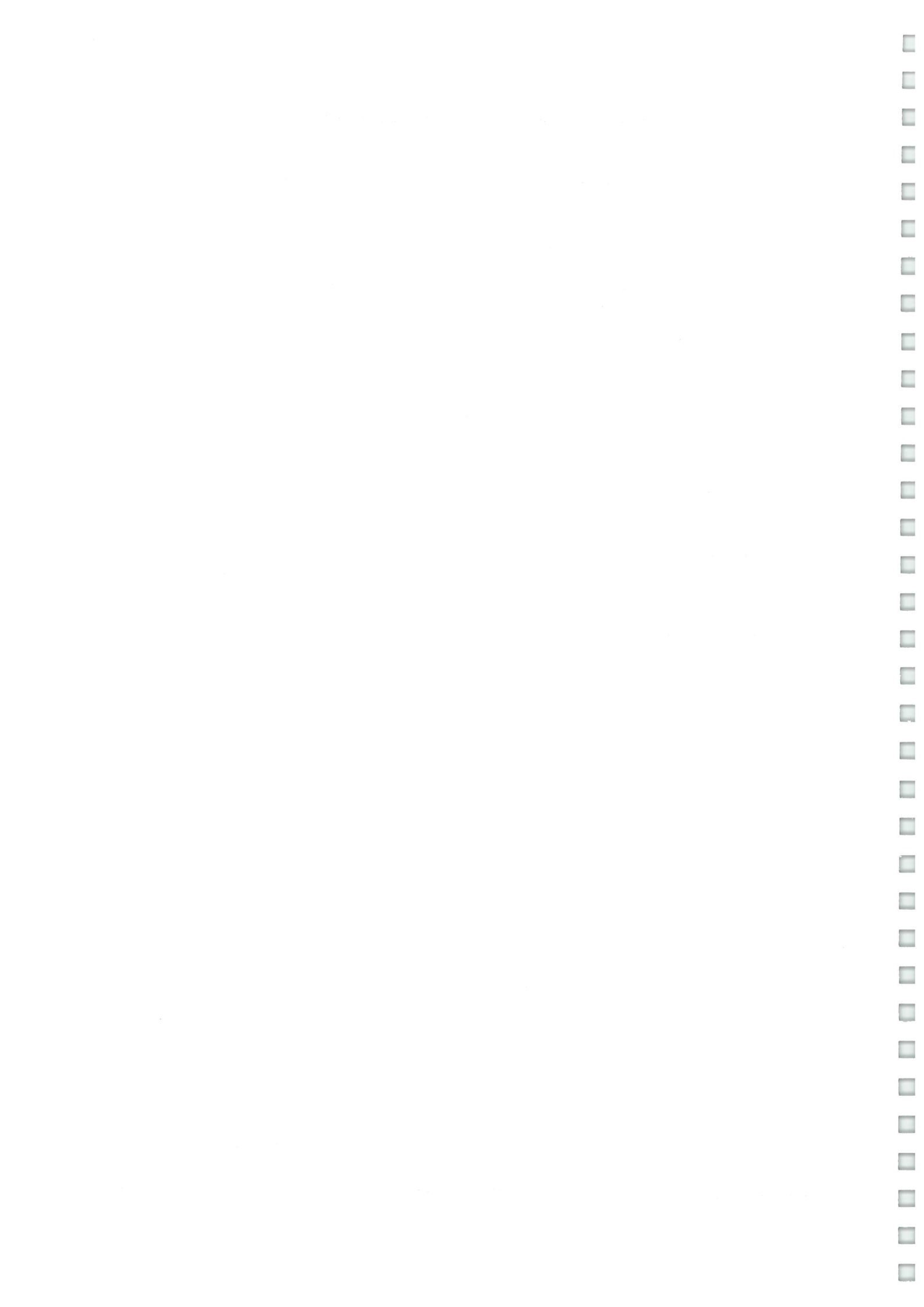
Nous donnons ici les équations rapportées au cas perpendiculaire *i.e.* lors que les directions du véhicule et du piéton sont orthogonales. En considérant que le véhicule se déplace le long de l'axe  $X$  (*confer* FIG.26 page 45) et en utilisant la conservation de la quantité de mouvement, nous pouvons écrire :

$$m_{VL}\vec{V}_c + m_P\vec{V}_F = m_{VL}\vec{V}'_c + m_P\vec{V}_P \quad (1)$$

$$m_{VL}V_c = m_{VL}V'_c + m_PV_P \quad (2)$$

**Hypothèse n°1** : Si l'on suppose qu'à la fin de la phase de contact, les vitesses respectives de sortie de choc du piéton et de la voiture sont identiques, on peut remplacer dans l'équation (1) le terme  $V_P$  par  $V'_c$ . Dans ce cas, on obtient :

$$V_c = \left(1 + \frac{m_P}{m_{VL}}\right)V'_c \quad (3)$$



**NB :** La vitesse de sortie de choc de la voiture  $V'_c$  est calculée en utilisant un **MUD** (Mouvement Uniformément Décéléré) ( $V'_c = \sqrt{2 \cdot a_m \cdot s_{K-E}}$ ).

La variation de vitesse subie par le véhicule s'écrit :  $\Delta V = V_c - V'_c$ .

**Hypothèse n°2 :** A la fin de la phase de contact, la vitesse du piéton n'est pas égale à celle du véhicule. Suivant MOSER et BURG [22], la vitesse de projection du piéton (*i.e.* la vitesse de sortie de choc) peut s'écrire comme étant un certain pourcentage de la vitesse de sortie du véhicule :

$$V_P = IF \cdot V'_c \quad (4)$$

Le terme  $IF$  est défini comme le Facteur d'Impact (Impact Factor) (Anstoßfaktor), il est totalement empirique et dépend de multiples paramètres. MOSER et BURG ont défini dans [22] différentes valeurs du facteur d'impact sont données suivant la classification par géométrie avant des véhicules (*confer* FIG.28 page 47).

Type Coin Wedge shape	Type Flotteur Pontoon	Type Boîte Box shape		Facteur d'Impact Impact Factor
0,6	0,75	0,95	1	Anstoßfaktor AF

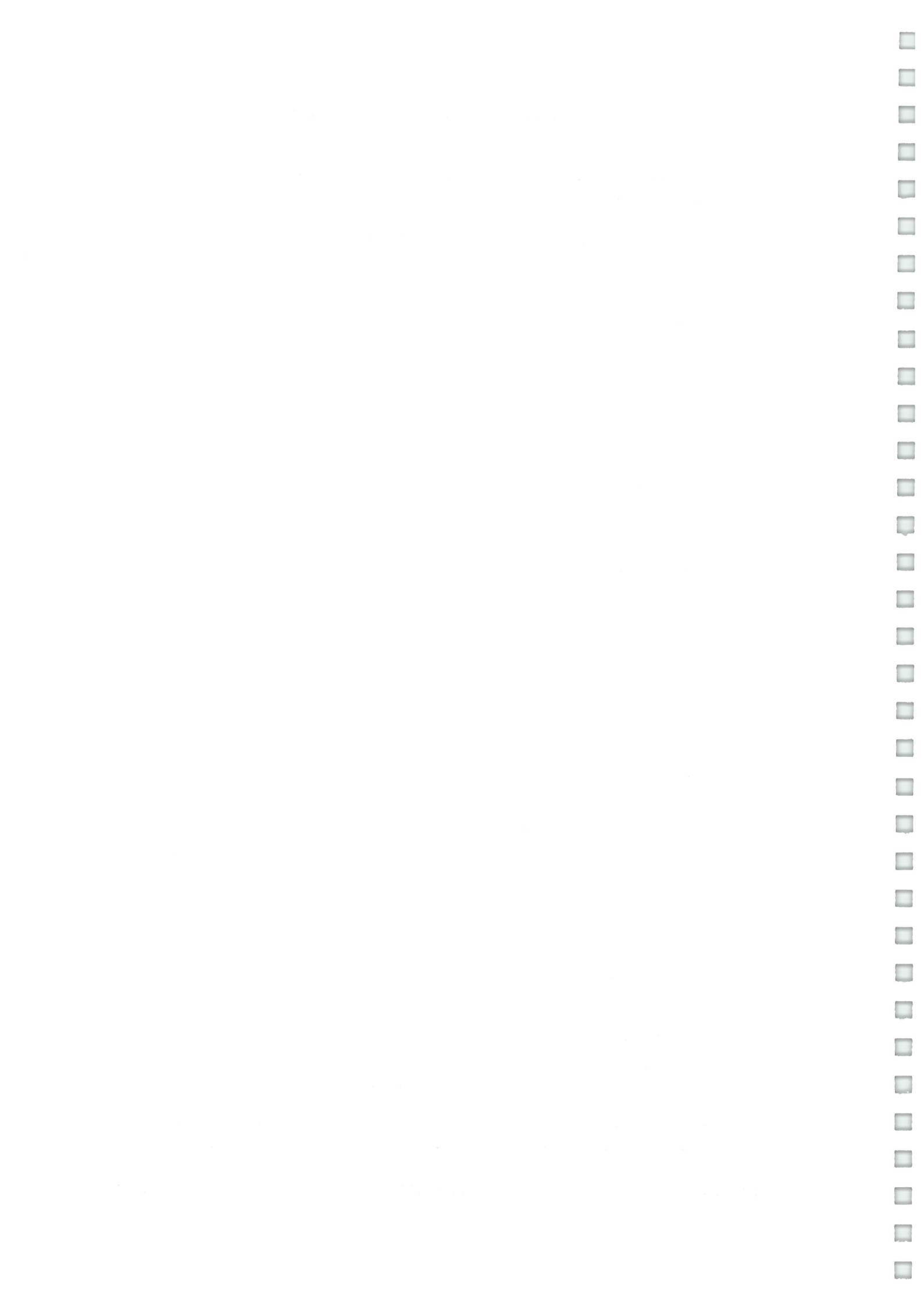
FIGURE 28 – Valeur du facteur d'impact selon la géométrie de la face avant du véhicule

La combinaison des équations (2) et (4) permet d'écrire :

$$V_c = \left(1 + \frac{m_P}{m_{VL}} \cdot IF\right) \cdot V'_c \quad (5)$$

### 9.1.1.2 Cas avec angle

Le cas de figure évoqué précédemment concerne les configurations pour lesquelles la direction de déplacement du piéton est perpendiculaire à celle du véhicule. Cependant, dans



certains cas de figures, la direction du déplacement du piéton n'est pas perpendiculaire à la chaussée de la route. En conséquence, il convient d'intégrer l'angle  $\phi$  formé par la direction de déplacement du piéton et l'axe  $X$  (colinéaire à l'axe de la route). En considérant la projection de la conservation de la quantité de mouvement sur l'axe  $X$  (confer FIG. 8 page 48), on obtient :

$$m_{VL} \cdot V_c + m_P \cdot V_F \cdot \cos \phi = m_{VL} \cdot V'_c + m_P \cdot V_P \quad (6)$$

En utilisant l'équation (4) écrite précédemment, nous avons :

$$m_{VL} \cdot V_c + m_P \cdot V_F \cdot \cos \phi = m_{VL} \cdot V'_c + m_P \cdot V'_c \cdot IF \quad (7)$$

et finalement :

$$V_c = \left(1 + \frac{m_P}{m_{VL}} \cdot IF\right) - \frac{m_P}{m_{VL}} \cdot V_F \cdot \cos \phi \quad (8)$$

On remarquera que :

- si le piéton évolue dans la même direction que le véhicule :  $\phi = 0^\circ$ .
- si le piéton évolue dans la direction opposée de celle du véhicule :  $\phi = 180^\circ$ .

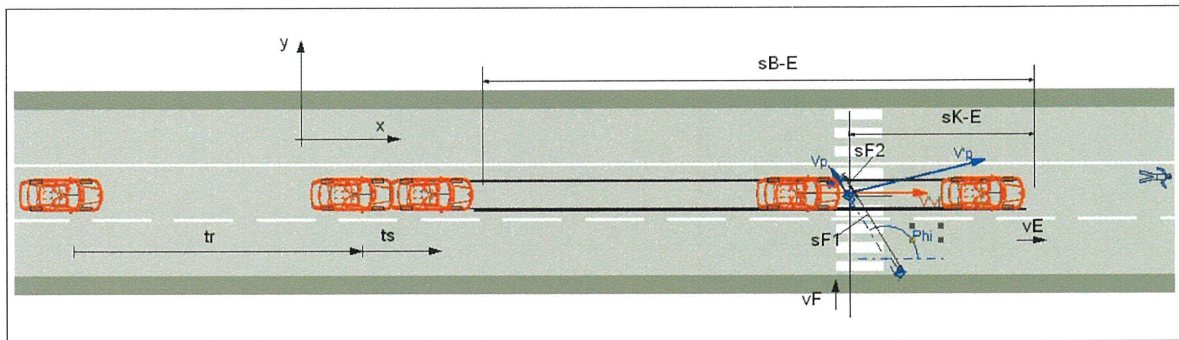


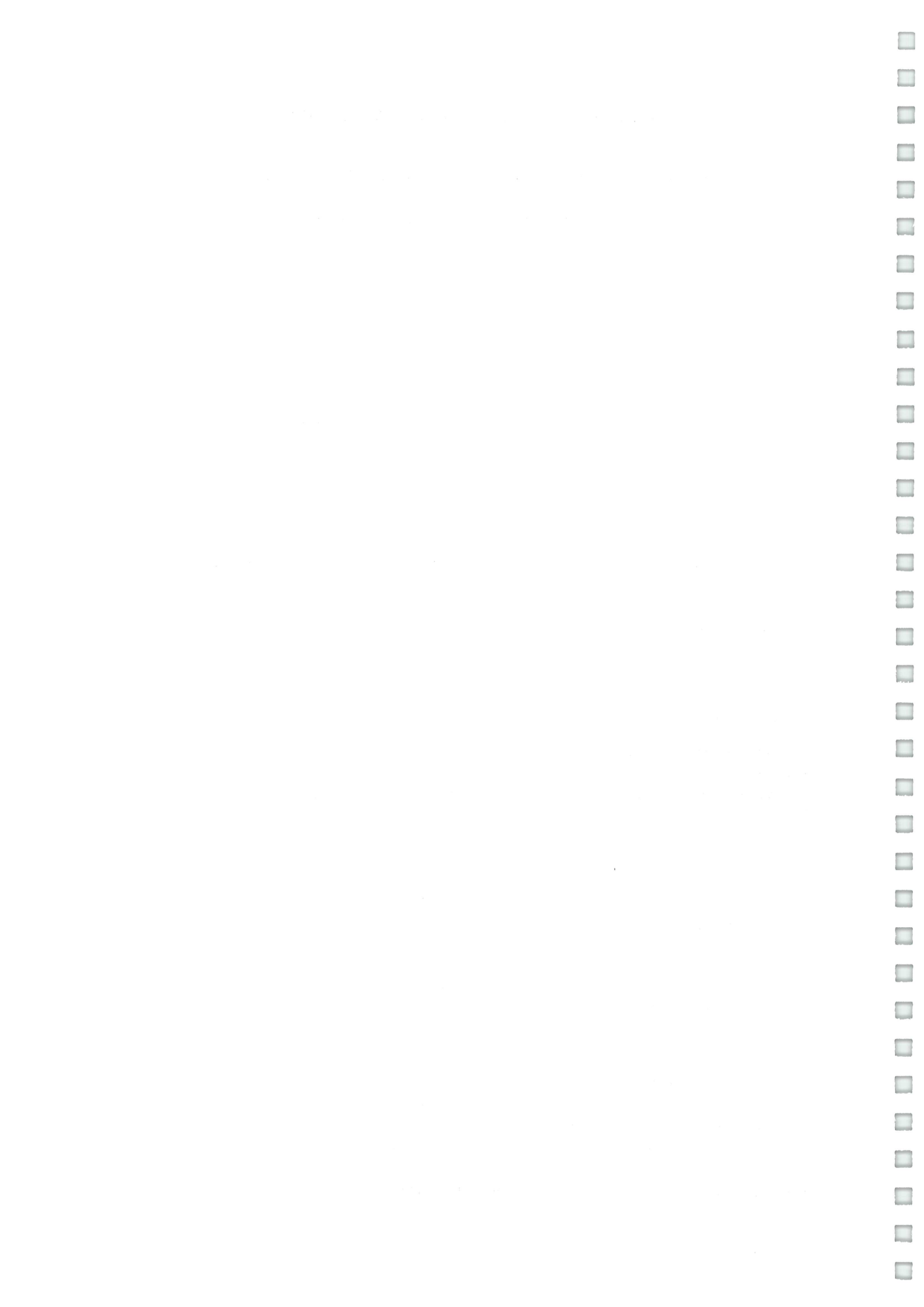
FIGURE 29 – Modélisation cinématique simple d'une collision voiture contre piéton avec angle

## 9.2 Utilisation de modélisations analytiques simples

### 9.2.1 Modélisation de la trajectoire post-impact du piéton, similaire à celle d'un projectile

Lorsque aucune trace de type freinage n'est retrouvée au sol lors des investigations *in situ*, mais que la zone de choc et la position résiduelle du piéton sont connues, il est possible d'estimer la vitesse du véhicule connaissant entre-autre, la distance de projection du piéton.

Avant d'examiner les équations usuellement utilisées par les investigateurs en reconstruction dans les collisions véhicule contre piéton, il est utile d'examiner le mouvement du piéton





projeté à une vitesse et un angle connus dans un champs gravitationnel. Cette trajectoire est communément appelée : “mouvement d’un projectile” (projectile motion). Nous allons voir que la majorité des équations utilisées découlent de cette modélisation.

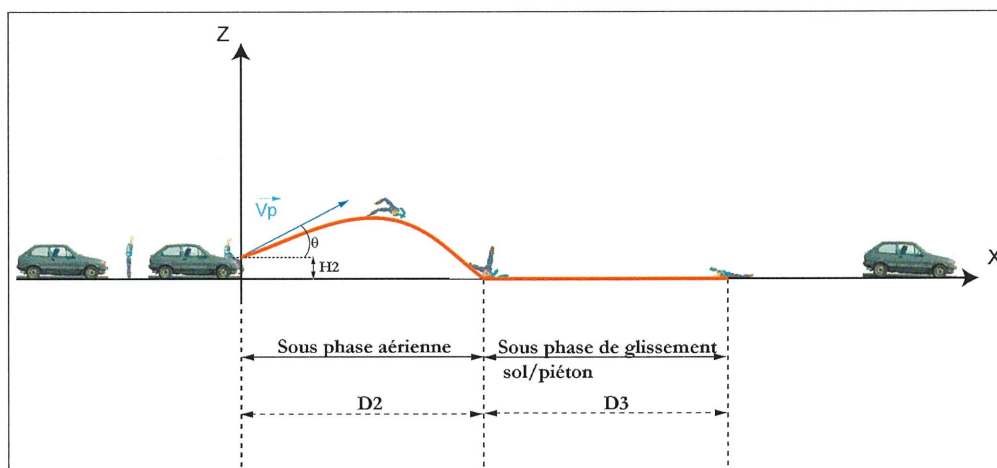


FIGURE 30 – Modélisation de la trajectoire post-impact du piéton.

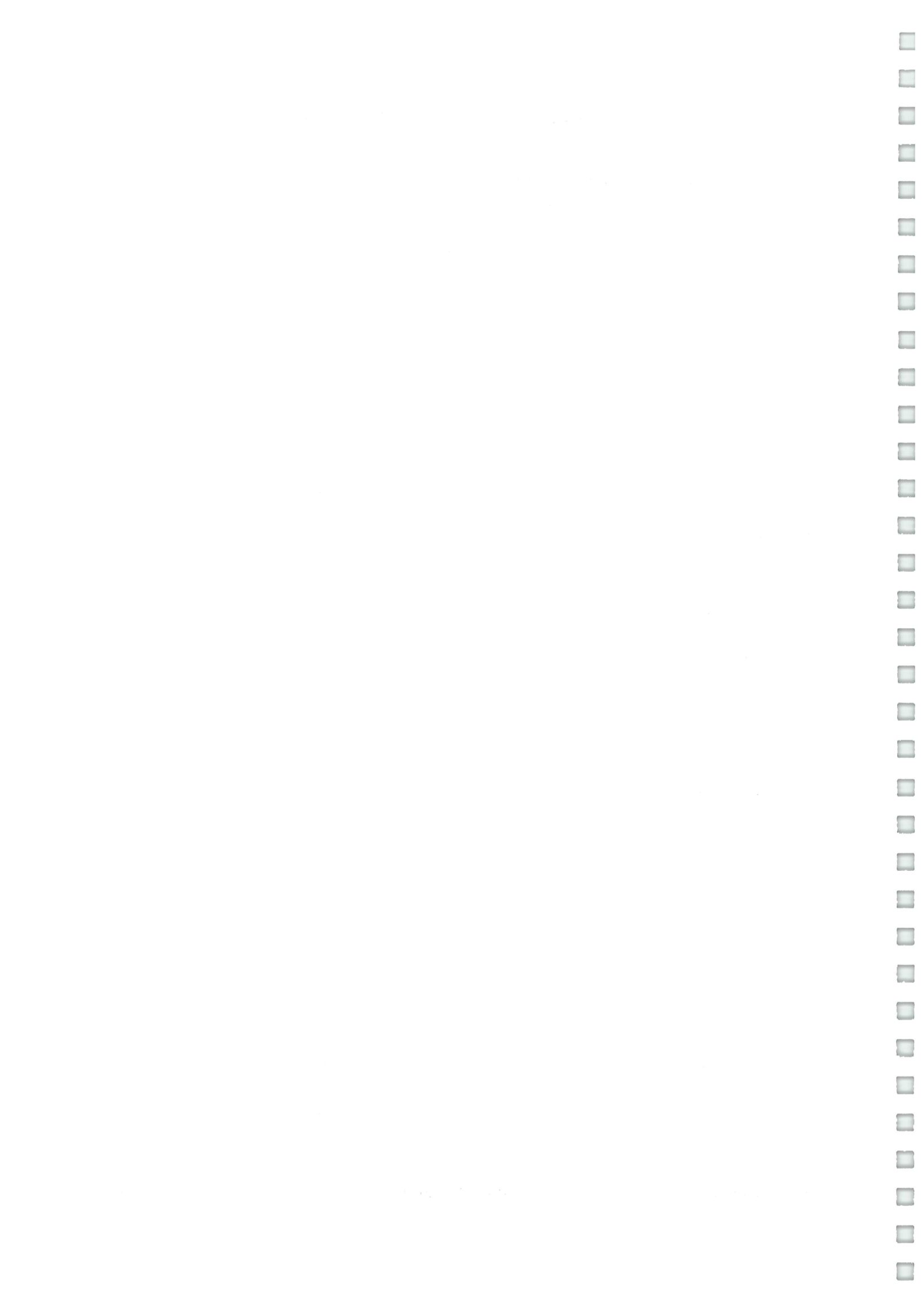
Nous allons décrire la trajectoire du piéton projeté via les lois de la balistique et de la cinématique du point. Le piéton est assimilé à un point matériel pesant dans le repère orthonormé  $(O, X, Y, Z)$ .

### 9.2.1.1 Notations

$X$  : Distance sur l’axe horizontal (=abscisses),  
 $Z$  : Distance sur l’axe vertical (=ordonnées),  
 $V_x$  : Vitesse sur l’axe X (composante horizontale de la vitesse) [m/s],  
 $V_z$  : Vitesse sur l’axe Z (composante verticale de la vitesse)[m/s],  
 $g$  : Accélération de la pesanteur ( $= 9.81m/s^2$ ),  
 $\theta$  : Angle de projection ( $^\circ$ ),  
 $H_2$  : Hauteur du tir [m],  
 $D_2$  : Distance parcourue par le piéton durant la sous-phase aérienne [m],  
 $D_3$  : Distance parcourue par le piéton durant la sous-phase de glissement au sol [m],  
 $t$  : Temps [s],  
 $m$  : Masse du piéton [kg],  
 $\mu_p$  : Coefficient de friction entre le piéton et le sol,  
 et  $V_p$  la vitesse initiale du projectile (*i.e.* du piéton après impact avec la voiture) [m/s].

### 9.2.1.2 Hypothèses

- Le piéton est considéré comme un point pesant.
- Le mouvement du CG du piéton s’effectue dans le plan formé par les axes  $X$  et  $Z$ .
- On néglige les forces de frottement de l’air.
- Le premier choc sol-piéton est considéré comme mou (inélastique).



### 9.2.1.3 Équations à la sous-phase aéroportée du piéton

Le principe fondamental de la dynamique permet d'écrire dans le repère  $(O, X, Y, Z)$  :

$$\sum \vec{F} = m \vec{a} \iff m \vec{g} = m \vec{a} \iff \vec{g} = \vec{a} \iff$$

$$(1) \begin{cases} a_x = \frac{dV_x}{dt} = 0 & \text{Bilan des forces sur l'axe horizontal} \\ a_z = \frac{dV_z}{dt} = -g & \text{Bilan des forces sur l'axe vertical} \end{cases}$$

Une double intégration de (1) donne les vitesses et les chemins parcourus :

$$\begin{cases} V_x = cste_1 = V_p \cdot \cos \theta & (\text{avec les conditions initiales } (t=0) : cste_1 = V_p \cdot \cos \theta) \\ V_z = -g \cdot t + cste_2 = V_p \cdot \sin \theta - gt & (\text{avec les conditions initiales } (t=0) : cste_2 = V_p \cdot \sin \theta) \end{cases}$$

**Nota bene** : Les termes  $cste_i$  sont des constantes. On voit que la composante de la vitesse sur l'axe  $X$  est constante au cours du temps. Ainsi, au niveau du point de réception (point of landing) du piéton, la composante de la vitesse sur cet axe vaut toujours  $V_p \cdot \cos \theta$ .

$$\begin{cases} x = V_p \cdot \cos \theta \cdot t + cste_3 = V_p \cdot \cos \theta \cdot t & (\text{à } t=0 : cste_3 = 0) \\ z = -\frac{1}{2}gt^2 + V_p \cdot \sin \theta \cdot t + cste_4 = -\frac{1}{2}gt^2 + V_p \cdot \sin \theta \cdot t + H_2 & (\text{à } t=0 : cste_4 = H_2) \end{cases}$$

En posant :  $t = \frac{x}{V_p \cdot \cos \theta}$ , on obtient :

$$z = -\frac{1}{2} \cdot g \cdot \frac{x^2}{V_p^2 \cdot \cos^2 \theta} + \tan \theta \cdot x + H_2 \quad (9)$$

A la fin de la sous-phase aérienne, le piéton touche le sol c'est-à-dire quand  $z = 0$  et  $x = D_2$ . Ainsi (9) devient :

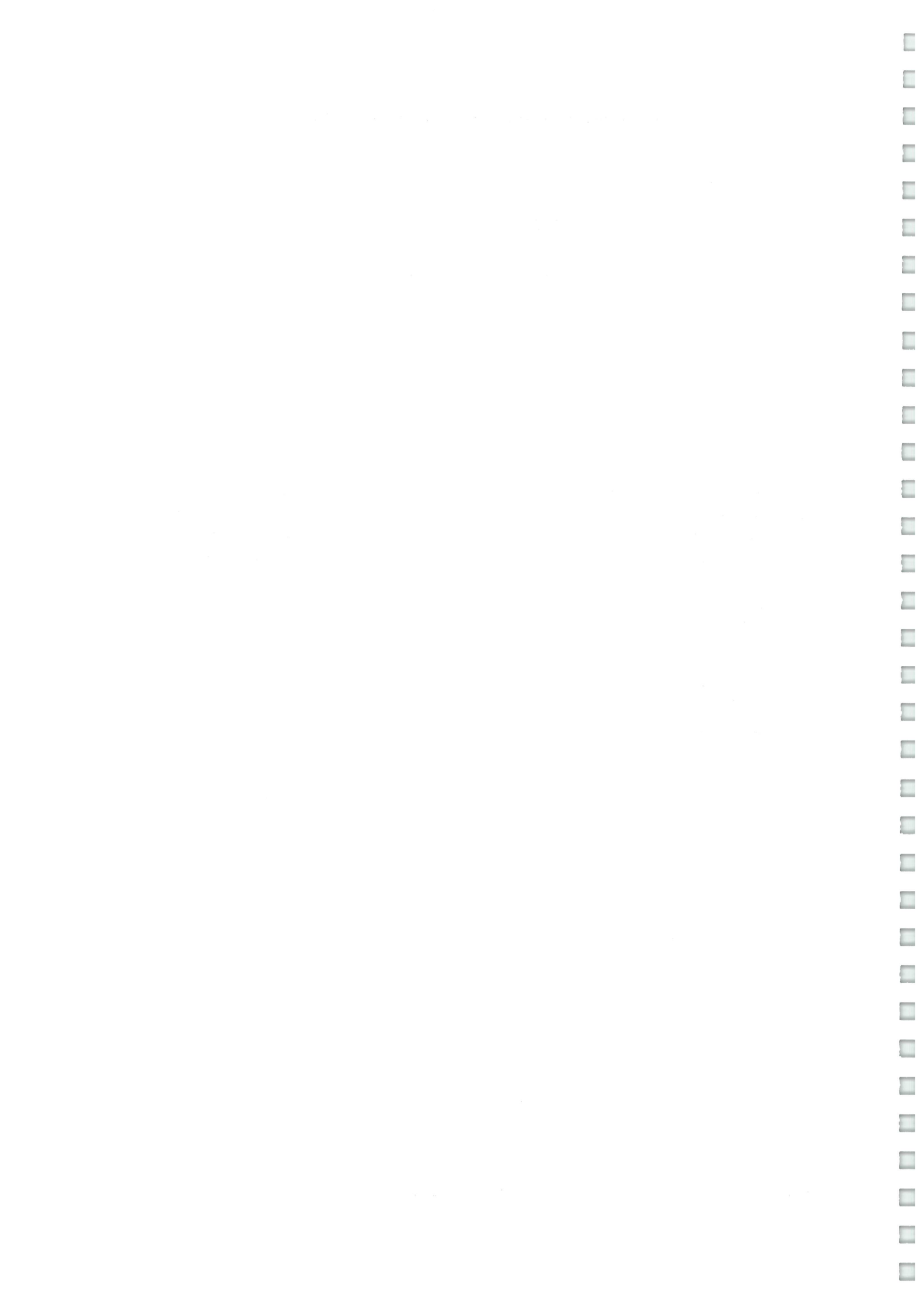
$$-\frac{1}{2} \cdot g \cdot \frac{D_2^2}{V_p^2 \cdot \cos^2 \theta} + \tan \theta \cdot D_2 + H_2 = 0 \quad (10)$$

L'équation (10) ci-dessus est une équation du second degré d'inconnue  $D_2$ . La résolution de cette équation donne deux racines :

$$D_2 = \frac{-\frac{\sin \theta}{\cos \theta} \pm \sqrt{\frac{\sin^2 \theta}{\cos^2 \theta} + \frac{2 \cdot g \cdot H_2}{V_p^2 \cdot \cos^2 \theta}}}{\frac{g}{V_p^2 \cdot \cos^2 \theta}} \quad (11)$$

Après simplification et en négligeant la racine qui donne une distance  $D_2$  négative, nous obtenons finalement la distance parcourue par le piéton durant la sous-phase aérienne :

$$D_2 = \frac{V_p \cdot \cos \theta}{g} \left( V_p \cdot \sin \theta + \sqrt{V_p^2 \cdot \sin^2 \theta + 2 \cdot g \cdot H_2} \right) \quad (12)$$



ou encore :

$$V_p = \sqrt{\frac{g}{2 \cdot \cos^2 \theta} + \frac{D_2^2}{H_2 + D_2 \cdot \tan \theta}} \quad (13)$$

L'équation (12) donne la portée d'un tir à une hauteur  $H_2$  du sol d'un objet assimilé à un point pesant avec un angle de lancement  $\theta$  et une vitesse initiale  $V_p$ .

Notons que la portée maximale du tir est atteinte environ pour  $\theta$  voisin de  $45^\circ$  (en théorie pour  $H_2 = 0$ ) et que dans ce cas (13) s'écrit :

$$V_p = \sqrt{\frac{g \cdot D_2^2}{H_2 + D_2}} \quad (14)$$

#### 9.2.1.4 Équation liée à la sous-phase de glissement au sol du piéton

Le mouvement d'un piéton roulant et/ou glissant au sol jusqu'à sa position résiduelle peut être modélisé en utilisant l'équation d'un mouvement uniformément décéléré. La décélération est normalement définie comme étant une proportion de l'accélération de la gravité basée sur l'interaction du piéton au sol souvent référencée par le coefficient de friction  $\mu_p$ . Nous faisons l'hypothèse que lorsque le piéton tombe au sol, le choc est mou ( $k = 0$ ) et que par conséquent la composante de la vitesse du CG du piéton en  $Z$  s'annule.

$$D_3 = \frac{V_{px}^2}{2 \cdot \mu_p \cdot g} = \frac{V_p^2 \cdot \cos^2 \theta}{2 \cdot \mu_p \cdot g} \quad (15)$$

Avec  $V_{px}$  : Vitesse longitudinale du piéton lorsqu'il tombe au sol ( $= V_p \cdot \cos \theta$ )

Avec les hypothèses de départ, les équations (13) et (15), on obtient que :

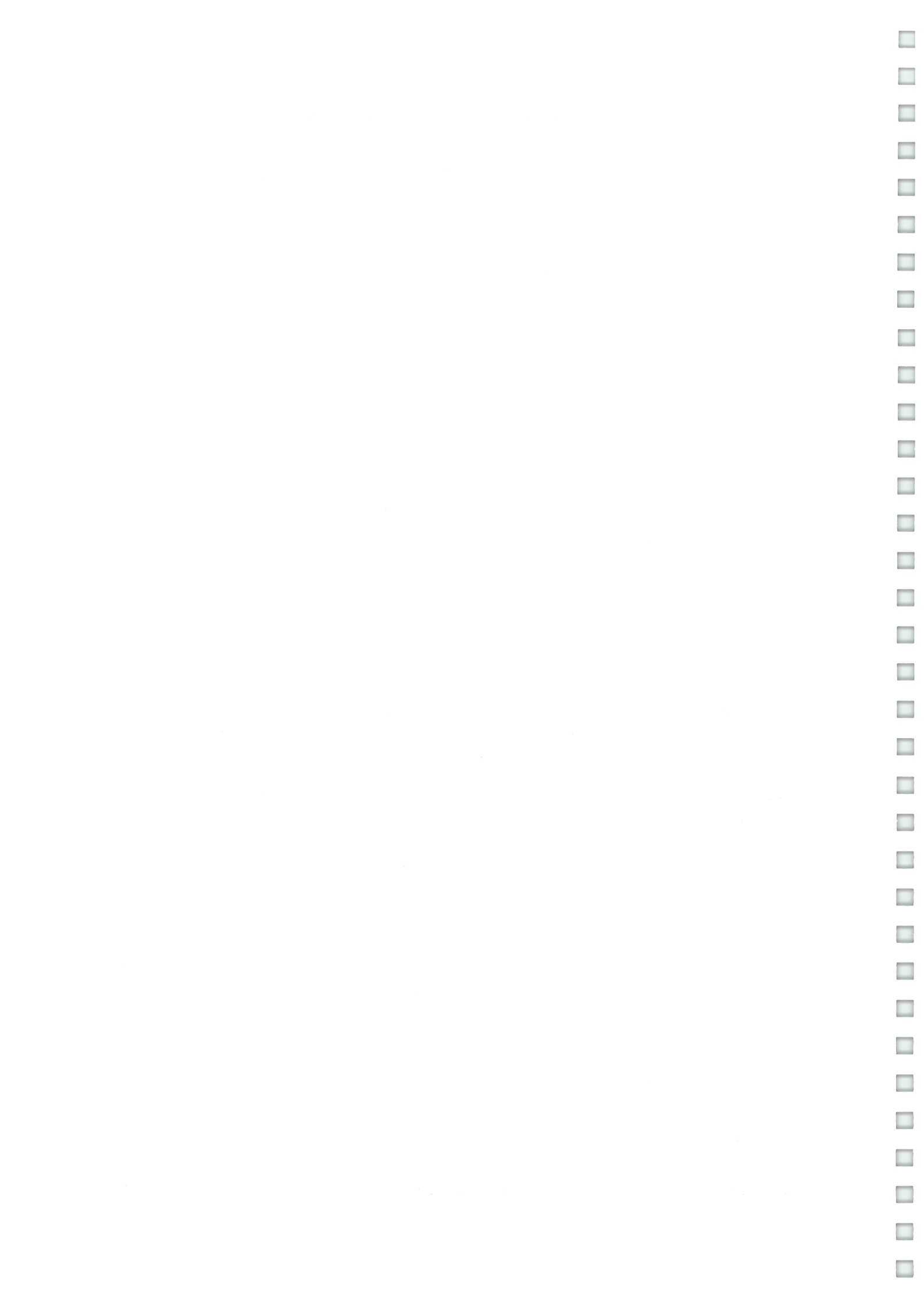
$$D_2 + D_3 = \frac{V_p \cdot \cos \theta}{g} \cdot [V_p \cdot \sin \theta + \sqrt{V_p^2 \cdot \sin^2 \theta + 2 \cdot g \cdot H_2}] + \frac{V_p^2 \cdot \cos^2 \theta}{2 \cdot \mu_p \cdot g} \quad (16)$$

Notons que la combinaison entre l'équation (14) et (15) ( $\theta = 45^\circ$ ) aboutit à l'équation :

$$V_p = \sqrt{g \cdot \left( \frac{D_2^2}{H_2 + D_2} + 2 \cdot \mu_p \cdot D_3 \right)} \quad (17)$$

Et qu'en prenant  $H_2 = 0$ , on retrouve la formule établie par RICH [26] :

$$V_p = \sqrt{g(D_2 + 2 \cdot \mu_p \cdot D_3)} \quad (18)$$



### 9.2.2 Modélisation simple dite “Fall and Slide” de Collins

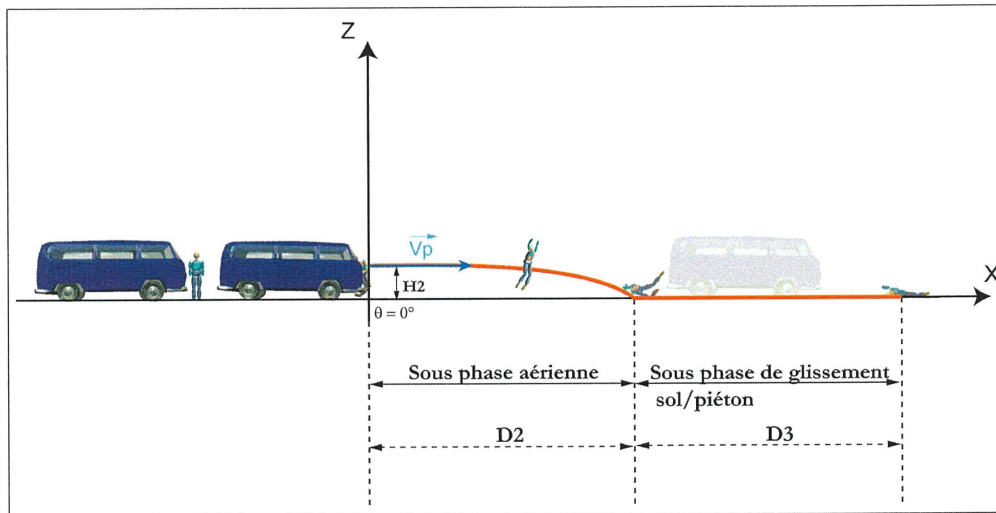


FIGURE 31 – Modélisation de la trajectoire post-impact du piéton selon COLLINS.

Dans la littérature scientifique traitant de la reconstruction des accidents impliquant un véhicule et un piéton, COLLINS [4] fut le premier à utiliser les formules de la balistique pour approcher la vitesse d'impact du véhicule heurtant. Pour cela, il modélise la trajectoire post-impact du piéton en deux sous-phases :

- sous-phase aérienne dans laquelle le piéton est réduit à un point matériel pesant.
- sous-phase de glissement au sol dans laquelle le piéton glisse depuis sa réception au sol jusque sa position résiduelle.

L'auteur suppose que le piéton percuté par un véhicule est projeté vers l'avant et horizontalement ( $\theta = 0^\circ$ ).

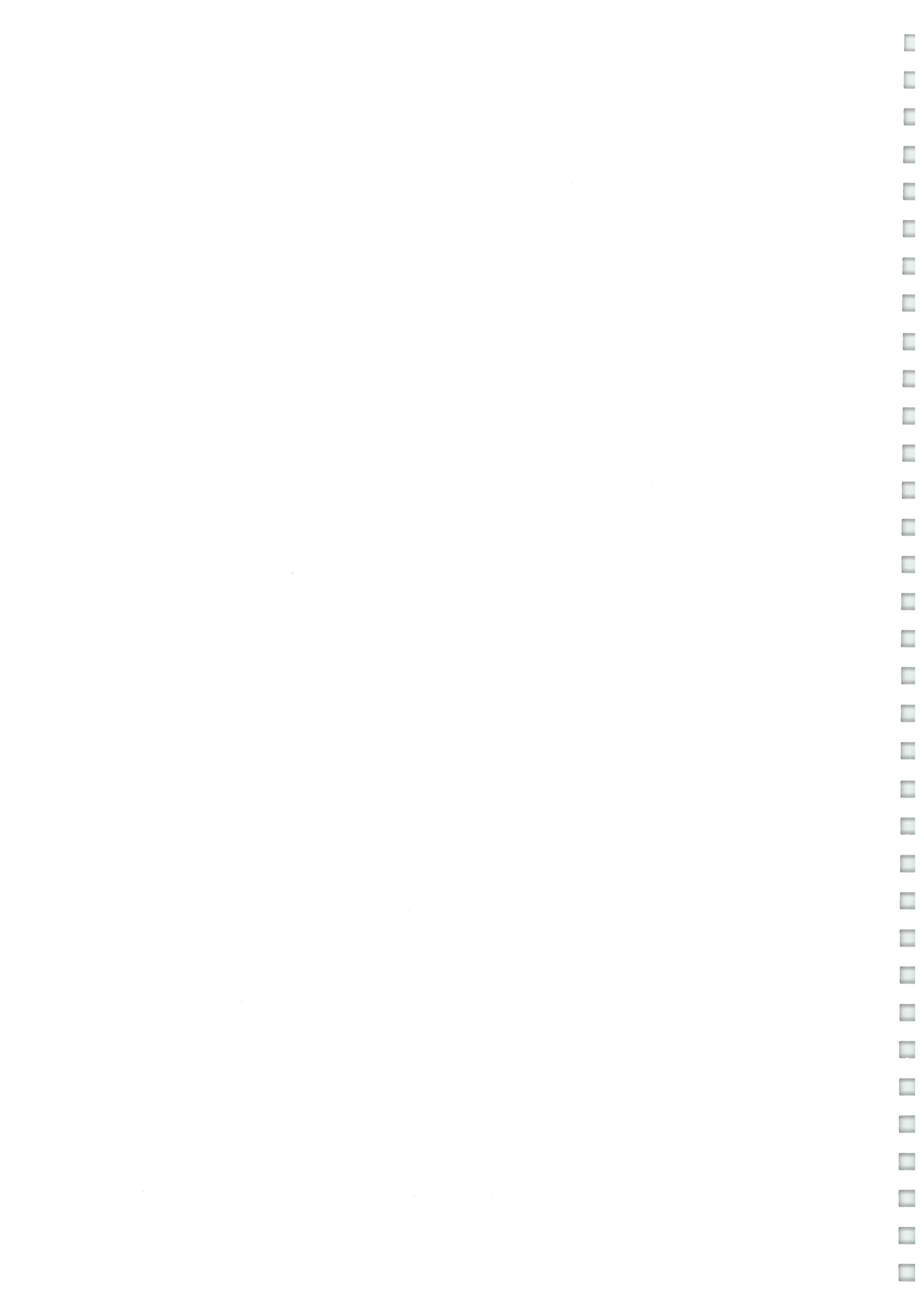
En combinant le mouvement du piéton lors de la sous-phase aérienne (tir balistique) et celui au sol (mouvement uniformément décéléré par frottement), COLLINS obtient avec  $\theta = 0$  la formule suivante :

$$\underbrace{\frac{1}{2 \cdot \mu_p \cdot g} \cdot V_p^2 + \sqrt{\frac{2 \cdot H_2}{g}} \cdot V_p - D_p}_{\text{équation (16) pour } \theta=0} = 0 \quad (19)$$

Avec :

- $D_p$  : Distance de projection du piéton (throwing distance) [m],
- $D_2$  : Distance parcourue par le piéton durant la sous-phase aéroportée [m],
- $D_3$  : Distance parcourue par le piéton durant la sous-phase de glissement [m],
- $H_2$  : Hauteur du CG du piéton [m],





$V_p$  : Vitesse de projection du piéton [m/s].

On voit que l'équation (19) est de la forme  $A \cdot V_p^2 + B \cdot V_p + C = 0$  où :

$$A = \frac{1}{2 \cdot \mu_p \cdot g}$$

$$B = \sqrt{\frac{2 \cdot H_2}{g}}$$

$$C = -D_p$$

Celle-ci a pour discriminant :  $\Delta = B^2 - 4 \cdot A \cdot C$  et admet une solution positive :

$$V_p = \frac{-B + \sqrt{\Delta}}{2 \cdot A}$$

D'après STEVENSON (voir [41]) qui a testé plusieurs formules par comparaison avec des données d'accidents réels, la formule de COLLINS est particulièrement efficace pour les cas où l'angle de projection n'est pas connu et/ou la forme avant du véhicule est de type "boîte". Nous utiliserons cette formule pour les trajectoires post-impact piéton de type projection vers l'avant.

### 9.2.3 Modélisation simple dite "Fall, bouncing and Sliding" de Searle and Searle (1983)

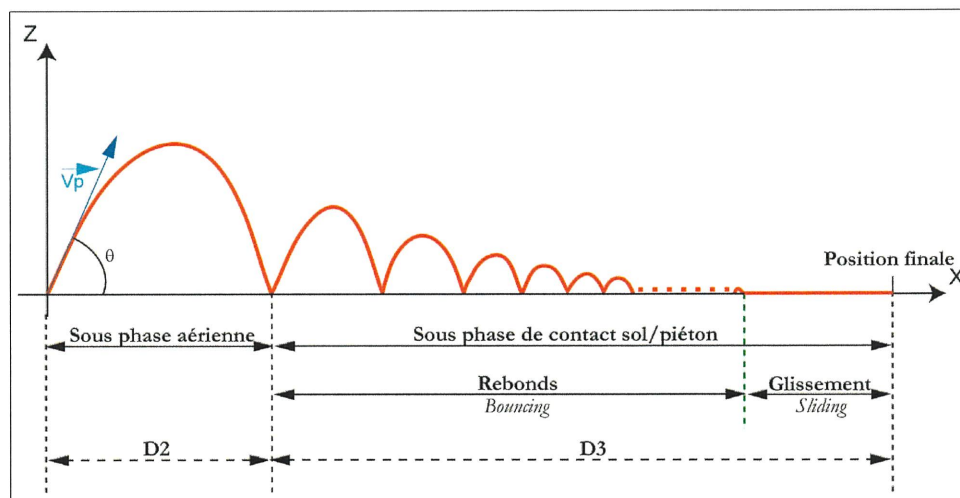


FIGURE 32 – Modélisation de la trajectoire post-impact du piéton selon SEARLE et SEARLE [31].

En 1983, SEARLE et SEARLE (voir [31]) proposent une nouvelle modélisation de la trajectoire post-impact du piéton en décomposant la sous-phase de contact sol-piéton en deux temps (*confer* FIG 32 page 53) :



- un temps durant lequel le piéton rebondit au sol,
- un temps durant lequel le piéton glisse au sol avec frottement.

SEARLE aboutit à la formule suivante :

$$V_p = \frac{\sqrt{2 \cdot \mu_p \cdot g \cdot (D_2 + D_3)}}{\cos \theta + \mu_p \cdot \sin \theta} \quad (20)$$

On notera que même si le modèle prend en compte l'élasticité de chaque impact du piéton au sol, le coefficient de restitution  $k$  n'apparaît pas dans la formule (20) et que finalement  $V_p$  est une fonction de  $\theta$  pour  $\mu_p$ ,  $D_2$  et  $D_3$  connues. L'étude mathématique de la fonction  $V_p = f(\theta)$  permet de donner une vitesse minimale et maximale de projection :

$$V_{p(\min)} = \sqrt{\frac{2 \cdot \mu_p \cdot g \cdot (D_2 + D_3)}{1 + \mu_p^2}} \quad \text{avec } \theta = \arctan(\mu_p) \quad (21)$$

$$V_{p(\max)} = \sqrt{2 \cdot \mu_p \cdot g \cdot (D_2 + D_3)} \quad \text{avec } \theta \leq \theta_c = 180 - 2 \cdot \arctan \frac{1}{\mu_p} \quad (22)$$

**Nota bene** : Notons que les formules (21) et (22) permettent de s'affranchir du paramètre  $\theta$  qui est souvent une inconnue.

Les formules apportées par SEARLE et SEARLE peuvent être utilisées pour des trajectoires post-impact du piéton de type trajectoire enroulée et projection vers l'avant.

### 9.2.4 Modélisation simple dite "Fall, bouncing and Sliding" de Searle (1993)

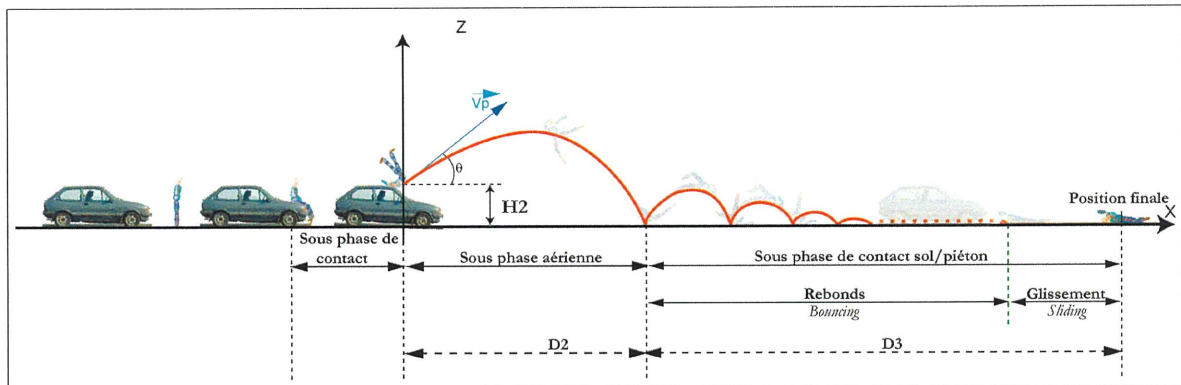
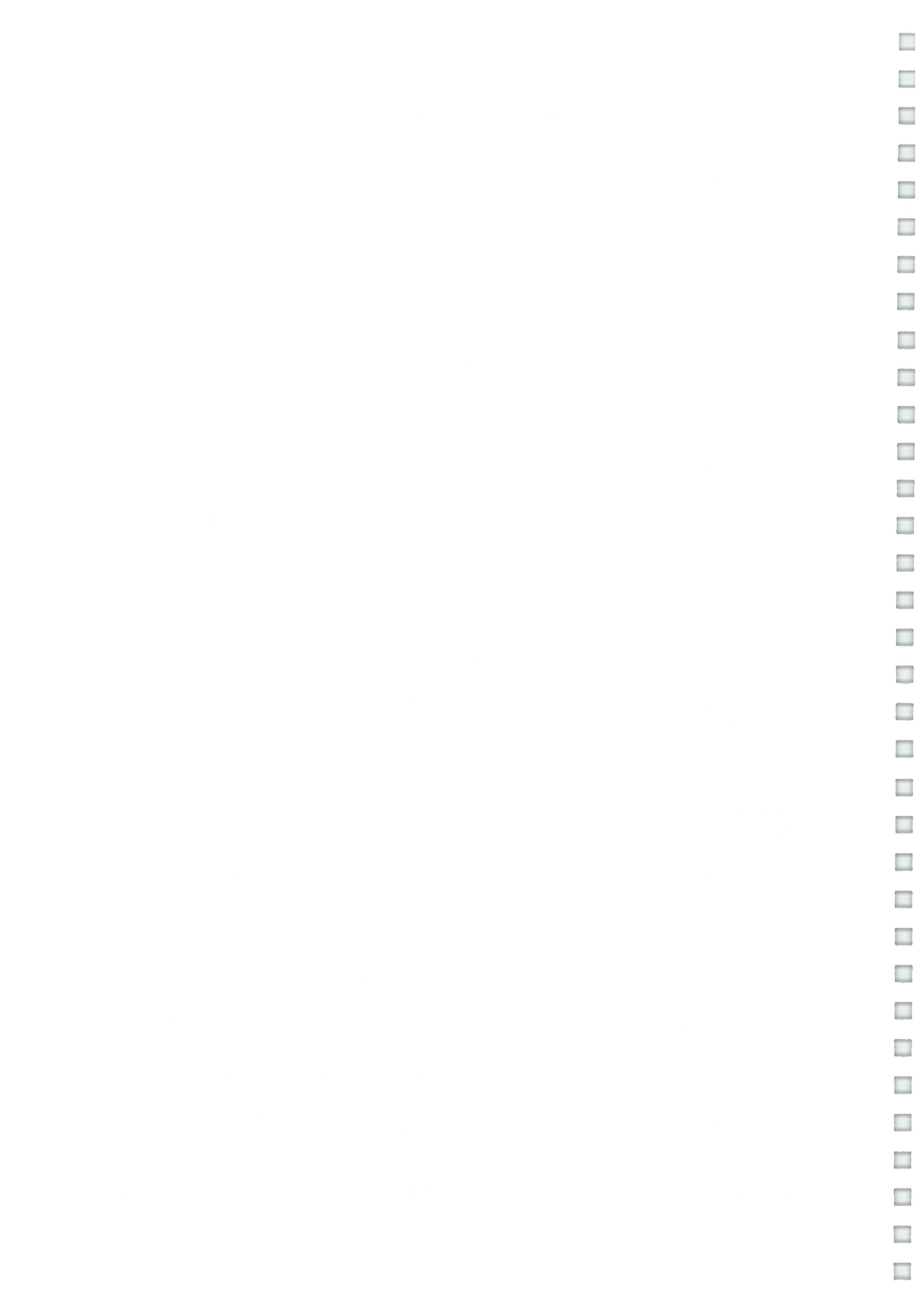


FIGURE 33 – Modélisation de la trajectoire post-impact du piéton selon SEARLE [32] avec prise en compte du paramètre  $H_2$ .

Dix ans après l'écriture du premier modèle [31], et sur le même principe, SEARLE reprend la modélisation initiale en y incorporant la hauteur de projection du piéton  $H_2$ . Il obtient



donc une expression liant la vitesse de projection du piéton  $V_P$ , l'angle de projection  $\theta^2$ , le coefficient de friction du piéton au sol  $\mu_p$ , la hauteur de projection<sup>3</sup>  $H_2$  et  $g$  qui représente la constante de gravité (9.81 m/s<sup>2</sup>) :

$$V_p = \frac{\sqrt{2 \mu_p g \cdot [(D_2 + D_3) + \mu_p H_2]}}{\cos \theta + \mu_p \sin \theta} \quad (23)$$

On voit de nouveau que  $V_P$  peut s'écrire de nouveau comme une fonction de  $\theta$  pour  $D_2$ ,  $D_3$ ,  $\mu_p$ , et  $H_2$ <sup>4</sup> donnés. L'étude de cette fonction sur l'intervalle  $[0, \frac{\pi}{2}]$  permet de donner une vitesse de projection minimale et arbitrairement une borne maximale :

$$V_{p(min)} = \sqrt{\frac{2 \mu_p g \cdot [(D_2 + D_3) + \mu_p H_2]}{1 + \mu_p^2}} \quad \text{avec } \theta = \arctan \mu_p \quad (24)$$

$$V_{p(max)} = \sqrt{2 \mu_p g \cdot [(D_2 + D_3) + \mu_p H_2]} \quad (25)$$

Lorsque le profil en long de la chaussée présente une pente ou une rampe, il suffit simplement de remplacer dans les formules (24) et (25) la constante  $g$  par  $g \cdot (\cos \alpha + \mu_p \sin \alpha)^5$ . On obtient alors :

$$V_{p(min)} = \sqrt{\frac{2 \mu_p g \cdot (\cos \alpha + \mu_p \sin \alpha) \cdot [(D_2 + D_3) + \mu_p H_2]}{1 + \mu_p^2}} \quad (26)$$

$$V_{p(max)} = \sqrt{2 \mu_p g \cdot (\cos \alpha + \mu_p \sin \alpha) \cdot [(D_2 + D_3) + \mu_p H_2]} \quad (27)$$

**Nota Bene** : Une démonstration complète des formules (26) et (27) a été réalisé par DAS et DHINGRA [43].

Lorsque la vitesse de projection du piéton est calculée, on utilise de nouveau la formule (28) donnant l'efficacité de projection pour calculer la vitesse d'impact du véhicule.

Les formules apportées par SEARLE peuvent être utilisées pour des trajectoires post-impact du piéton de type trajectoire enroulée et projection vers l'avant.

### 9.2.5 Détermination de la vitesse d'impact via l'Efficacité de projection

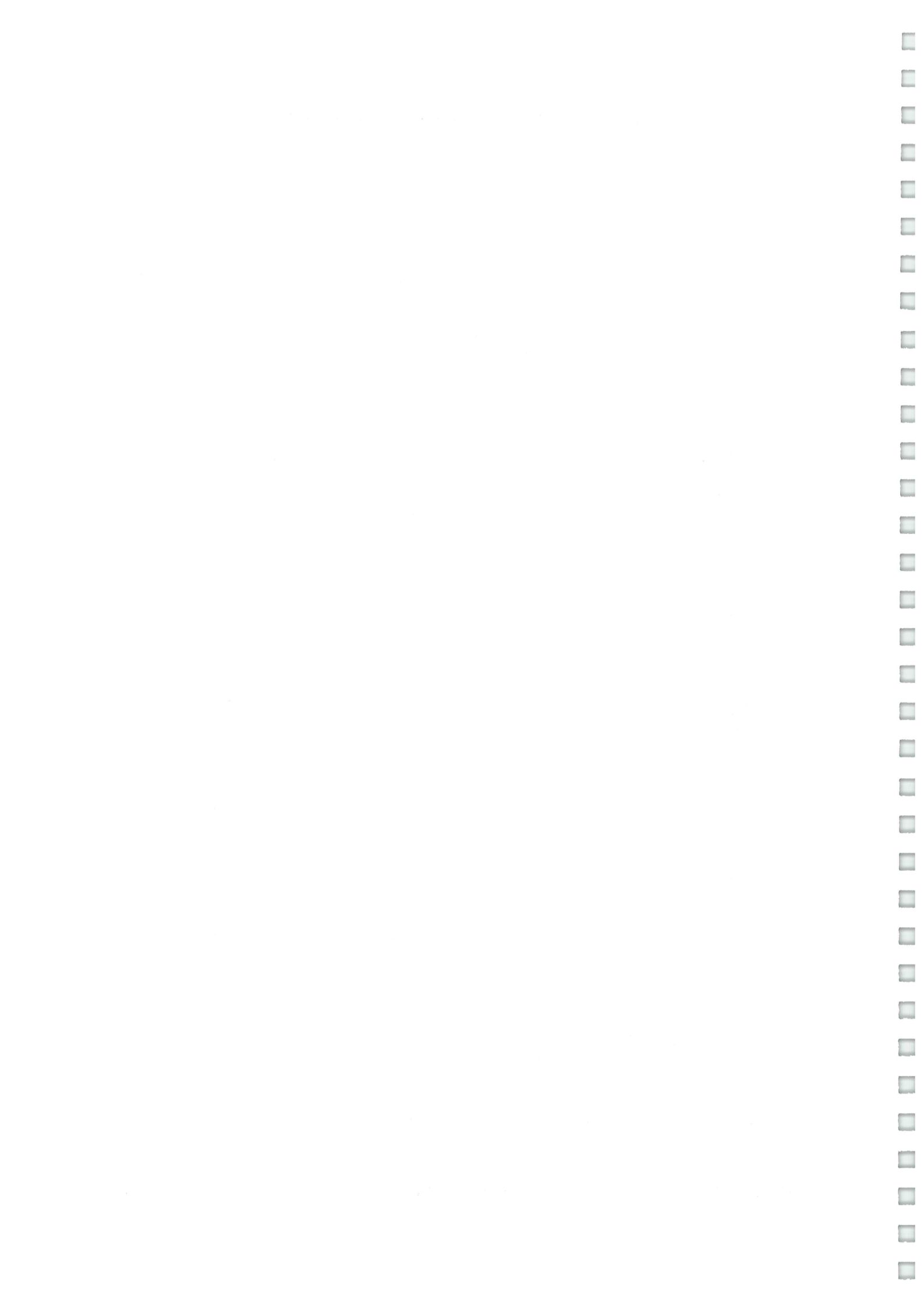
Dans la plupart des cas, après la phase de contact avec le véhicule, la vitesse de projection du piéton est inférieure à la vitesse d'impact du véhicule. En effet, dans les accidents les plus sévères, le véhicule passe en-dessous du piéton durant la phase de post-collision, ce qui prouve d'une certaine façon ce qui a été dit précédemment. Ainsi pour calculer la vitesse d'impact du véhicule connaissant la vitesse de projection du piéton, on utilise le terme  $PE$

2. De nombreuses études ont montré que l'angle de projection est rarement au dessus de 40°.

3. Il s'agit plus précisément de la distance séparant le moment de projection du piéton et le moment du premier contact au sol du piéton.

4. SEARLE estime que la hauteur à partir de laquelle le piéton est projeté est d'environ 1 mètre, ce qui semble assez réaliste étant donné que celui-ci est projeté depuis le capot du véhicule impactant.

5.  $\alpha = \arctan(\%_{pente})$ . Une pente de 5% s'écrit 0.05.





qui représente l'efficacité de projection (projection efficiency) [45] :

$$V_c = \frac{1}{PE} \cdot V_p \quad (28)$$

Une Efficacité de Projection de 100% se traduira dans la formule par  $PE = 1$ . On peut encore écrire la relation (28) ainsi :

$$PE = \frac{V_p}{V_c} \times 100\%$$

En réalité, l'emploi de l'Efficacité de Projection permet de modéliser la phase initiale de contact entre le piéton et le véhicule (*confer* FIG 33 page 54).

En projection vers l'avant, si on fait l'hypothèse que la vitesse initiale du piéton est négligeable par rapport à la direction de déplacement du véhicule, l'utilisation du principe de conservation de la quantité de mouvement permet de donner une relation entre la vitesse de projection du piéton et la vitesse d'impact du véhicule :

$$PE = \frac{m_V}{m_V + m_P} \times 100\% \quad (29)$$

On notera que dans l'équation (29), lorsque la masse du véhicule est très supérieure à celle du piéton, le terme PE tend vers 100%. Dans [14], HAPPER et al indiquent que PE est comprise entre 80 et 100%. Par exemple, si on considère un véhicule de 850 kg impactant un piéton obèse de 200 kg, le terme PE vaut environ 80%.

En trajectoire "enroulée", EUBANKS [10] présente une relation liant le facteur PE, la hauteur du bord supérieur du capot ( $h_V$ ) et la hauteur du CG du piéton ( $h_P$ ) :

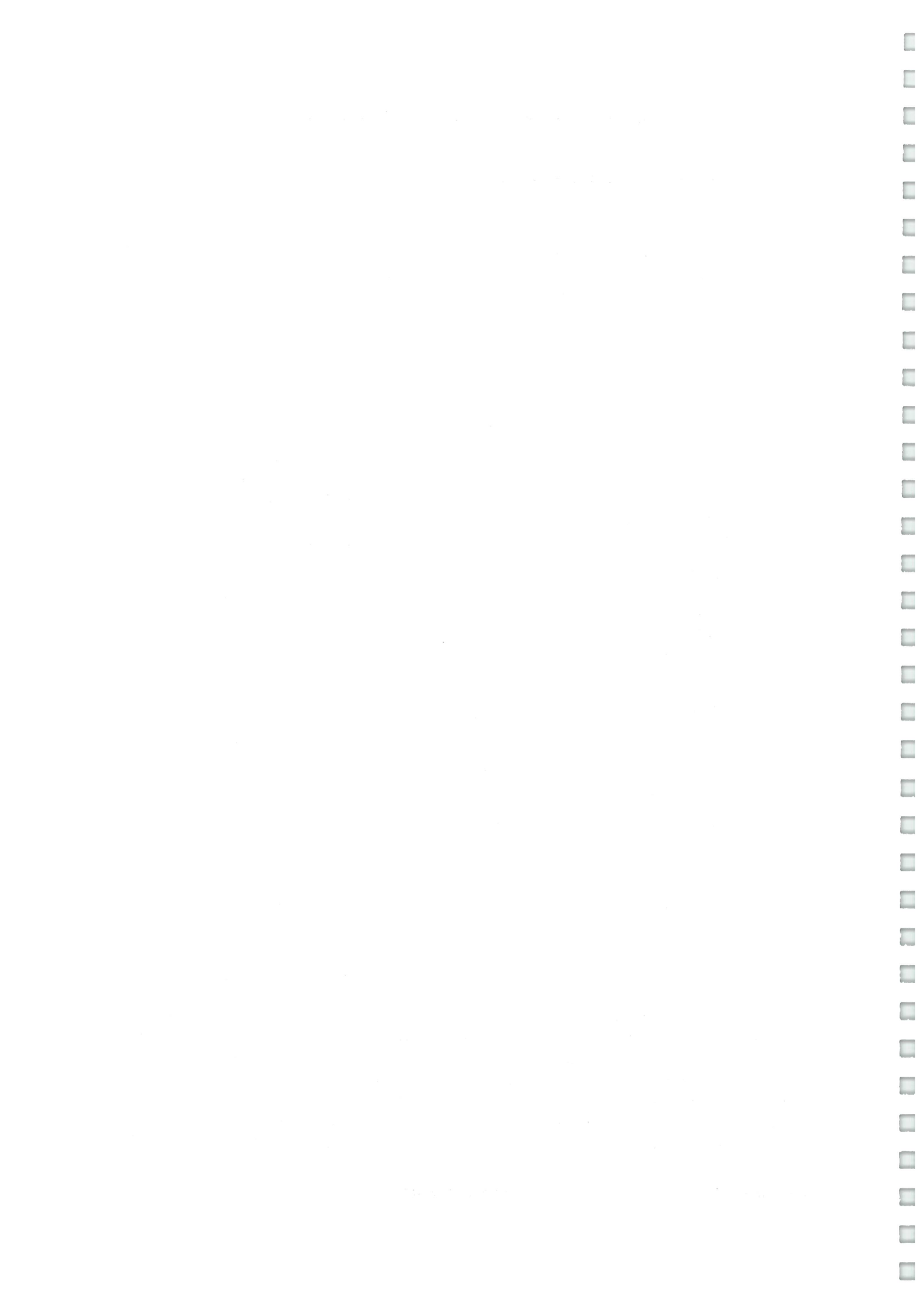
$$PE = \frac{h_V}{h_P} \times 100\% \quad (30)$$

**Remarque :** Le Facteur d'Impact (FI) (*confer* paragraphe 9.1.1 équation (4)) est le ratio de la vitesse de projection du piéton sur la vitesse de sortie de choc du véhicule alors que l'Efficacité de Projection se définit comme le ratio de la vitesse de projection du piéton sur la vitesse d'entrée de choc du véhicule.

Dans [1], P<sup>r</sup> APPEL et al donnent la vitesse du piéton sous forme de pourcentage (PE) de la vitesse d'impact du véhicule en fonction du type de piéton (enfant ou adulte) et du type de forme avant de véhicule ("coin" et "flotteur").

Forme avant	PE (Adultes)	PE (Enfants)
Coin ("V" form)	64.0 %	72.7 %
Flotteur ("poonton" form)	74.4 %	83.1 %

TABLE 6 – Efficacité de projection pour les piétons adulte et enfant en fonction de la forme avant du véhicule



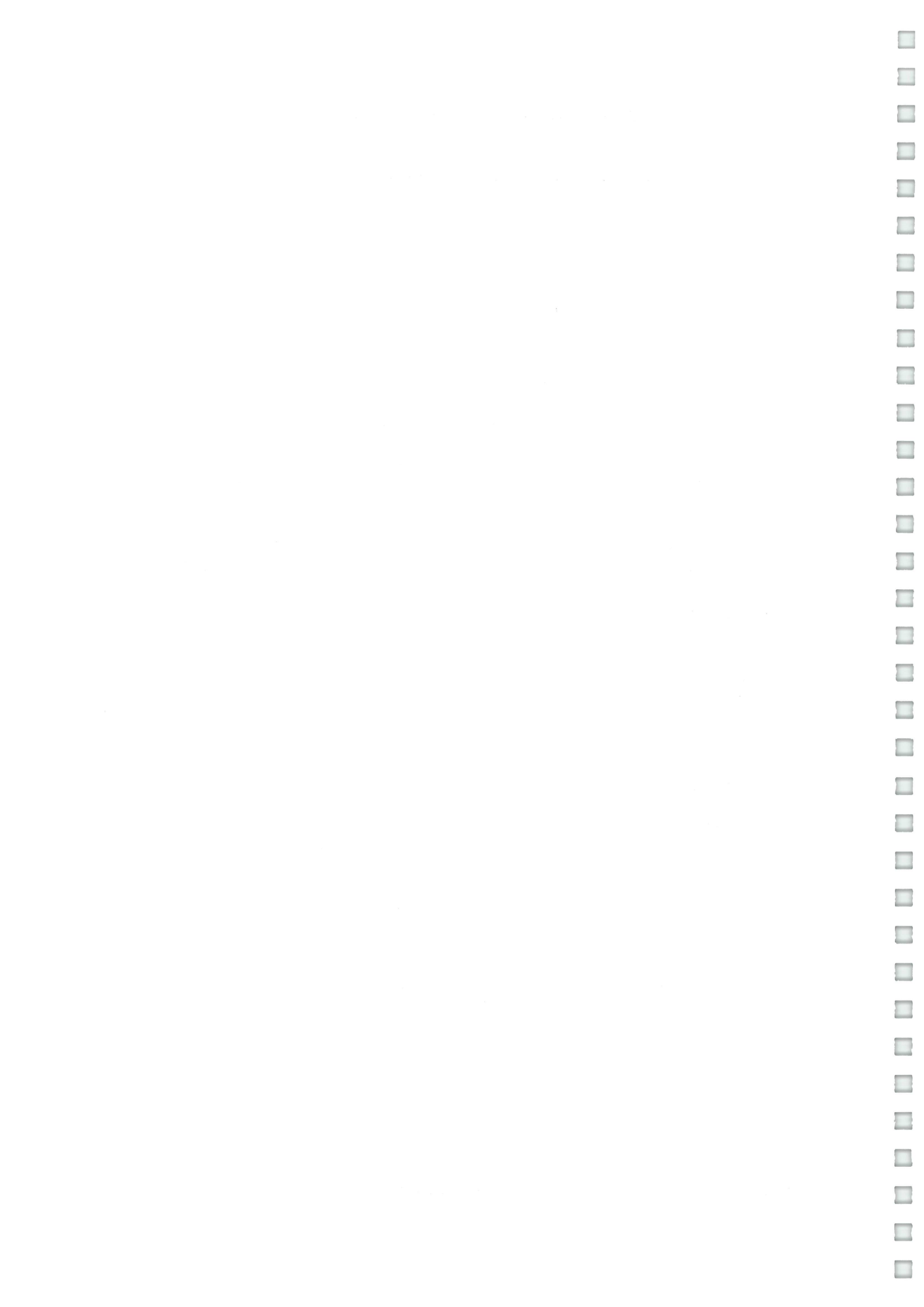
### 9.2.6 Coefficient de friction du piéton au sol

Nous rappelons ici que la décélération d'un corps glissant au sol est normalement définie comme étant une proportion de l'accélération de la gravité basée sur l'interaction souvent référencée par le coefficient de friction ou de frottement  $\mu_p$ . Il est à noter qu'il existe un débat important sur le coefficient de friction entre le piéton et le sol, particulièrement entre le glissement (sliding) et le roulement (trumbling) du piéton au sol. Les différentes publications donnent ce coefficient comme étant compris entre 0.4 et 1.2. Nous présentons ci-après les principales valeurs du coefficient de frottement piéton/sol que l'on peut trouver dans la littérature.

Source	Surface	$\mu_p$
Becke et Golder (1988) [2]	mouillé	0.43 - 0.53
	sec	0.5 - 0.72
Collins (1979) [4]	toute	0.8
Fricke (1990) [12]	bitume	0.45 - 0.60
	béton	0.40 - 0.65
	herbe	0.45 - 0.70
Galli		0.8 - 1.2
Künhel (1974) [16]		0.52 - 0.67
Limpert (1989) [18]		0.7 - 1.2
Lucchini (1980) [19]		0.37 - 0.51
Northwestern		0.45 - 0.6
Schneider et Beier (1974) [29]		0.81 - 1.02
Searle (1983) [31]	bitume	0.66
	herbe	0.79
Severy et Brink (1966) [34]		0.4 - 0.75
Stcherbatcheff (1975) [40]		0.4 - 0.71
Stevenson [41]	bitume	0.57 - 0.88
	herbe	0.54 - 0.60
Shurz et Sures (1976) [30]		0.4 - 0.74
Wood (1989) [48]		$\mu_p = 0.772 - 0.0019 \cdot V$

TABLE 7 – Valeurs du coefficient de frottement piéton/sol selon plusieurs publications (min : 0.37 et max : 1.2)

Dans certaines publications, il existe une zone d'ombre sur la façon d'obtenir une plage de valeurs de  $\mu_p$  (méthode - mesure). Il est suspecté que dans certains cas, le coefficient de frottement est directement calculé suivant la distance de projection du piéton pour des données d'accident réel pour lesquelles la vitesse d'impact a été obtenue en utilisant les traces de freinage du véhicule. Seulement, la distance de projection inclut la distance parcourue durant la sous-phase aérienne, pendant laquelle  $\mu_p$  vaut théoriquement 0, ce qui a pour effet de créer des différences importantes notamment pour les valeurs mesurées sur des tests cadavre ou mannequins. SEARLE [31] a mesuré le coefficient  $\mu_p$  sur surface bitumineuse et herbeuse dans deux états différents : mouillé et sec. Les différents tests qu'il a effectué montrent qu'il



n'existe pas de différence significative de  $\mu_p$  entre ces deux états que ce soit sur le bitume ou l'herbe. WOOD suggère dans [50] que le coefficient de frottement diminue en fonction de la vitesse du piéton en prenant  $\mu_p = 0.772 - 0.0019 \cdot V$  et  $\mu_p = 0.772$  pour des impacts à faible vitesse. Nous préconisons d'utiliser en priorité les valeurs données par SEARLE en 1983 qui semblent être les plus cohérentes.

## 9.3 Modélisations empiriques

Dans la réalité des accidents impliquant un véhicule et un piéton, le corps humain ne peut pas vraiment être considéré comme un point matériel. En effet, les différentes trajectoires qu'il subit avant et après collision sont particulièrement complexes. Même si de nombreux chercheurs ont redoublé d'effort ces trente dernières années pour donner une modélisation physico-mathématique fiable du comportement du corps, il peut être parfois difficile ou impossible de les utiliser. C'est pourquoi dans certains cas, des hypothèses doivent être construites pour résoudre les équations. Typiquement, le travail d'inférence et de recherche d'hypothèses supplémentaires peut s'appuyer sur des données empiriques.

Pour déterminer la vitesse d'impact d'un véhicule en fonction de la distance de projection du piéton, il existe de nombreuses formulations empiriques issues de données expérimentales (*e.g.* essais cadavres, mannequins, *etc.*) ou basées sur des données d'accidents bien documentés<sup>6</sup>. La démarche des modèles empiriques est de fournir une expression mathématique simple à partir de données réelles. Les modèles construits peuvent également incorporer plusieurs paramètres comme le type de géométrie avant du véhicule, ou encore la décélération du véhicule, *etc.* Le plus souvent, ces données sont présentées sous forme mathématique simple ou sous forme de courbes de régression linéaire.

Nous donnons ci-après quelques modèles empirico-statistique issus de la littérature.

### 9.3.1 APPEL (1975)

APPEL et al [1] donnent des formules simples liant la distance de projection du piéton à la vitesse d'impact du véhicule à partir de l'analyse de 137 accidents réels étudiés et très bien documentés. 4 relations sont données par catégorie :

**Véhicule en forme avant de type "flotteur"** (High fronted vehicle) :

$$D_p = 0.084 \cdot V_c^2 \quad (31)$$

**Véhicule en forme avant de type "coin"** (Low fronted vehicle) :

$$D_p = 0.065 \cdot V_c^2 \quad (32)$$

---

6. La vitesse d'impact résulte dans ces cas de l'analyse des traces de freinage et de calculs cinématiques simples.





**Adultes :**

$$D_p = 0.070 \cdot V_c^2 \quad (33)$$

**Enfants :**

$$D_p = 0.088 \cdot V_c^2 \quad (34)$$

Avec  $D_p$  la distance de projection en mètre et  $V_c$  la vitesse d'impact en m/s.  
Modèle valide pour trajectoire enroulée et projection vers l'avant.

### 9.3.2 STCHERBATCHEFF (1975)

A partir de données expérimentales, STCHERBATCHEFF et al [40] utilisent une formulation de la distance de projection comme étant fonction de la vitesse d'impact du véhicule avec prise en compte du coefficient de décélération plutôt que du coefficient de friction piéton/sol ( $\mu_p$ ). Il obtient :

$$D_p = \frac{V_c^2}{2 \cdot |a_m|} + 0.03 \cdot |a_m| \cdot V_c \quad (35)$$

Avec  $D_p$  la distance de projection en mètre,  $a_m$  la décélération du véhicule en  $\text{m/s}^2$  et  $V_c$  la vitesse d'impact en m/s.

Ce modèle est valide pour trajectoire enroulée et projection vers l'avant.

### 9.3.3 KÜHNEL (1976)

KÜHNEL [17] montre via des essais mannequins, que si le véhicule est freiné durant l'impact, la distance longitudinale de projection augmente proportionnellement avec le carré de la vitesse d'impact :

$$D_p = \frac{0.0271}{|a_m|} \cdot V_c^2 + 0.0178 \cdot |a_m| \cdot V_c \quad (36)$$

Avec  $V_c$  la vitesse d'impact [km/h] et  $a_m$  la décélération du véhicule [ $\text{m/s}^2$ ].

Par ailleurs, KÜHNEL propose une tolérance de  $\pm 3.6$  km/h.

### 9.3.4 STURZ (1976)

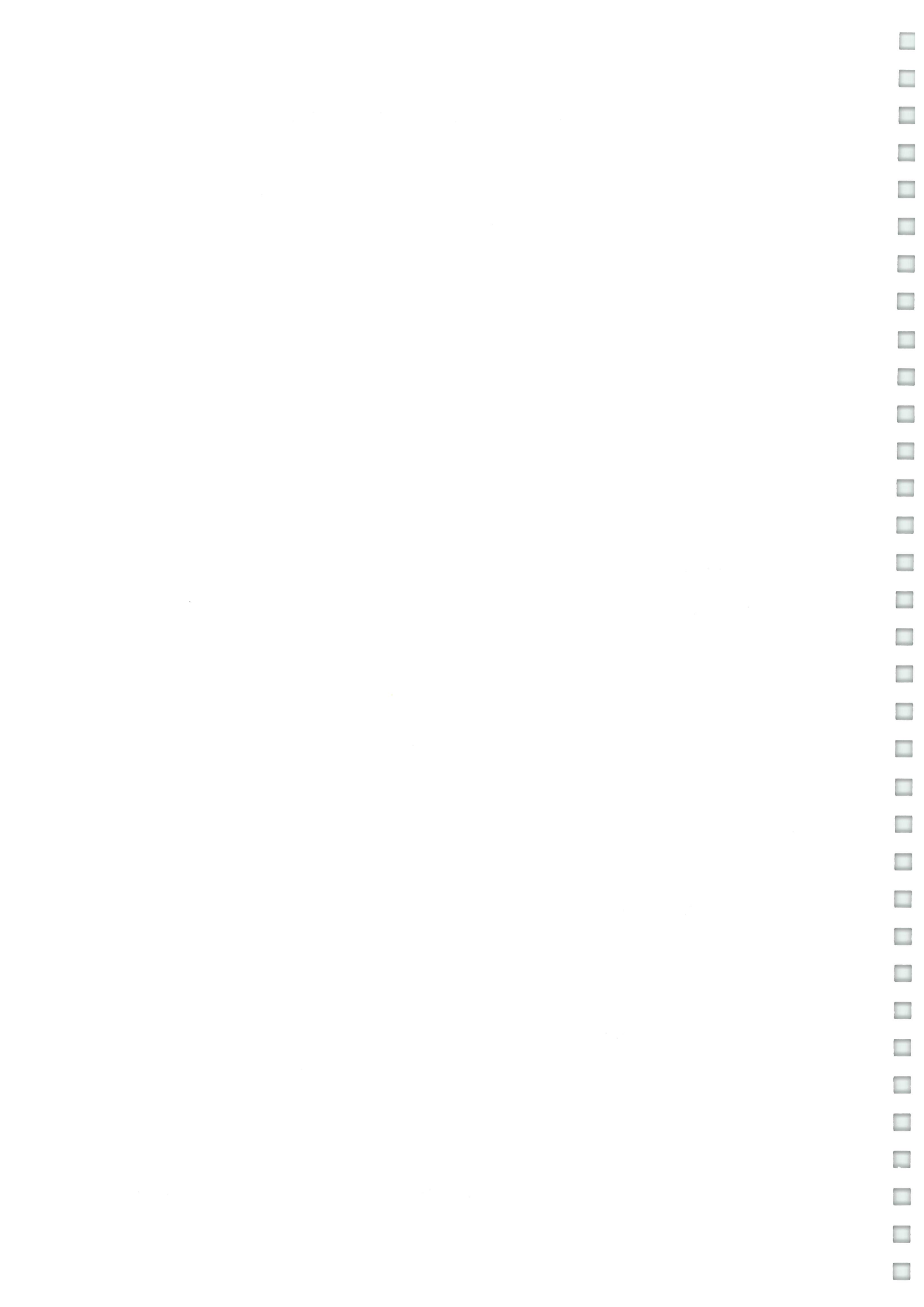
STURZ et al [42] reprennent les données du P<sup>r</sup> APPEL et définissent deux catégories : les enfants comme individus âgés de moins de 16 ans et les adultes. Ils obtiennent les relations suivantes :

#### Véhicule en forme avant de type "flotteur" (High fronted vehicle) :

**Enfants :**

$$D_p = 0.6 + 0.76 \cdot V_c + 0.0021 \cdot V_c^3 \quad (37)$$





**Adultes :**

$$D_p = 1.0 + 0.61 \cdot V_c + 0.0018 \cdot V_c^3 \quad (38)$$

**Véhicule en forme avant de type “coin” (Low fronted vehicle) :**

**Enfants :**

$$D_p = 0.6 + 0.0665 \cdot V_c^2 \quad (39)$$

**Adultes :**

$$D_p = 1.0 + 0.654 \cdot V_c + 0.0045 \cdot V_c^3 \quad (40)$$

Avec  $D_p$  la distance de projection en mètre et  $V_c$  la vitesse d'impact en m/s.  
Modèle valide pour trajectoire enroulée et projection vers l'avant.

### 9.3.5 WOOD (2000)

WOOD et SIMMS proposent un modèle hybride théorique de collisions véhicule contre piéton dont les limites des paramètres sont déterminées par des données statistiques.

$$\text{Wood [49] : } \begin{cases} V_c(\text{min}) = 2.5 \cdot \sqrt{D_p} \\ V_c(\text{moy}) = 3.6 \cdot \sqrt{D_p} \\ V_c(\text{max}) = 4.5 \cdot \sqrt{D_p} \end{cases} \quad (41)$$

Avec  $D_p$  la distance de projection en mètre et  $V_c$  la vitesse d'impact en m/s.

### 9.3.6 FUGGER (2000)

FUGGER et RANDLES [13] donnent un modèle empirique valable uniquement pour les projections vers l'avant :

$$V_c = 8.3604 \cdot D_p^{0.6046} \quad (42)$$

Avec  $D_p$  la distance de projection en mètre et  $V_c$  la vitesse d'impact en km/h.

### 9.3.7 TOOR (2002)

TOOR et al [44] utilisent un modèle empirique basé sur 359 collisions véhicule/piéton provenant de divers sources.



**Projection vers l'avant :**

$$V_c = 11.3 \cdot \sqrt{D_p} - 0.3 \quad (43)$$

Intervalle de prédiction : [15<sup>ème</sup> centile, 85<sup>ème</sup> centile] : ± 10.5 km/h

Intervalle de prédiction : [5<sup>ème</sup>centile, 95<sup>ème</sup> centile] : ± 14 km/h

**Trajectoire enroulée :**

$$V_c = 13.5 \cdot \sqrt{D_p} - 4.6 \quad (44)$$

Intervalle de prédiction : [15<sup>ème</sup> centile, 85<sup>ème</sup> centile] : ± 9 km/h

Intervalle de prédiction : [5<sup>ème</sup>centile, 95<sup>ème</sup> centile] : ± 12 km/h

**Combiné (projection vers l'avant + trajectoire enroulée) :**

$$V_c = 12.8 \cdot \sqrt{D_p} - 3.6 \quad (45)$$

Intervalle de prédiction : [15<sup>ème</sup> centile, 85<sup>ème</sup> centile] : ± 9.5 km/h

Intervalle de prédiction : [5<sup>ème</sup>centile, 95<sup>ème</sup> centile] : ± 12.8 km/h

Avec  $D_p$  la distance de projection en mètre et  $V_c$  la vitesse d'impact en km/h.

**Nota bene :** La dernière formulation ne doit être utilisée que si l'on ne peut pas statuer sur le choix d'un type de trajectoire post-impact du piéton (projection vers l'avant et trajectoire enroulée). Par ailleurs, d'après les auteurs, l'intervalle [15<sup>ème</sup> centile, 85<sup>ème</sup> centile] est à considérer lorsque l'on souhaite obtenir des valeurs assez fiables avec un équilibre des probabilités raisonnable. L'intervalle [5<sup>ème</sup>centile, 95<sup>ème</sup> centile] est plutôt à utiliser lorsque l'on souhaite obtenir un intervalle de valeurs très fiable comme par exemple dans les investigations criminalistiques où l'on se situe au-delà de tout doute raisonnable.

### 9.3.8 TOOR (2003)

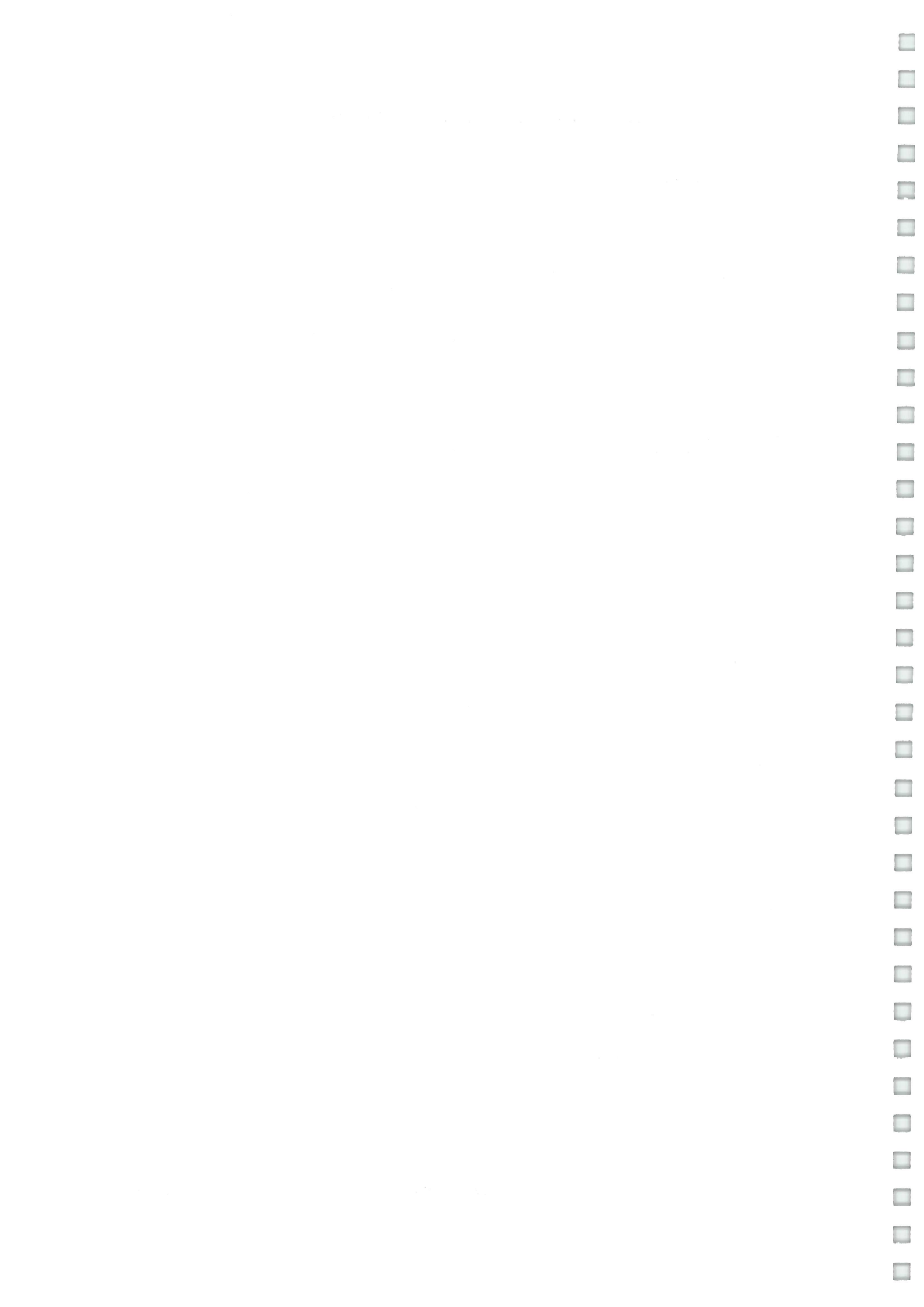
TOOR et al [45] réévaluent les formulations issues de [44] présentées ci-dessus et donnent trois nouvelles équations :

**Projection vers l'avant :**

$$V_c = 8.25 \cdot D_p^{0.61} \quad (46)$$

Intervalle de prédiction : [15<sup>ème</sup> centile, 85<sup>ème</sup> centile] : ± 7.7 km/h

Intervalle de prédiction : [5<sup>ème</sup>centile, 95<sup>ème</sup> centile] : ± 12.2 km/h



**Trajectoire enroulée :**

$$V_c = 9.84 \cdot D_p^{0.57} \quad (47)$$

Intervalle de prédiction : [15<sup>ème</sup> centile, 85<sup>ème</sup> centile] : ± 5.8 km/h

Intervalle de prédiction : [5<sup>ème</sup> centile, 95<sup>ème</sup> centile] : ± 9.2 km/h

**Combiné (projection vers l'avant + trajectoire enroulée) :**

$$V_c = 9.19 \cdot D_p^{0.59} \quad (48)$$

Intervalle de prédiction : [15<sup>ème</sup> centile, 85<sup>ème</sup> centile] : ± 6.5 km/h

Intervalle de prédiction : [5<sup>ème</sup> centile, 95<sup>ème</sup> centile] : ± 10.2 km/h

Avec  $D_p$  la distance de projection en mètre et  $V_c$  la vitesse d'impact en km/h.

### 9.3.9 SIMMS (2004)

SIMMS et al [37] donnent en 2004 une modélisation basé sur des statistiques pour deux types de trajectoires :

**Projection vers l'avant :**

$$V_{col}(m/s) = M_r \cdot [A \cdot \sqrt{S(m)} + B] \quad (49)$$

**Trajectoire enroulée :**

$$V_{col}(m/s) = M_r \cdot [C \cdot [\sqrt{S(m)} - S_0]^D] \quad (50)$$

Avec :

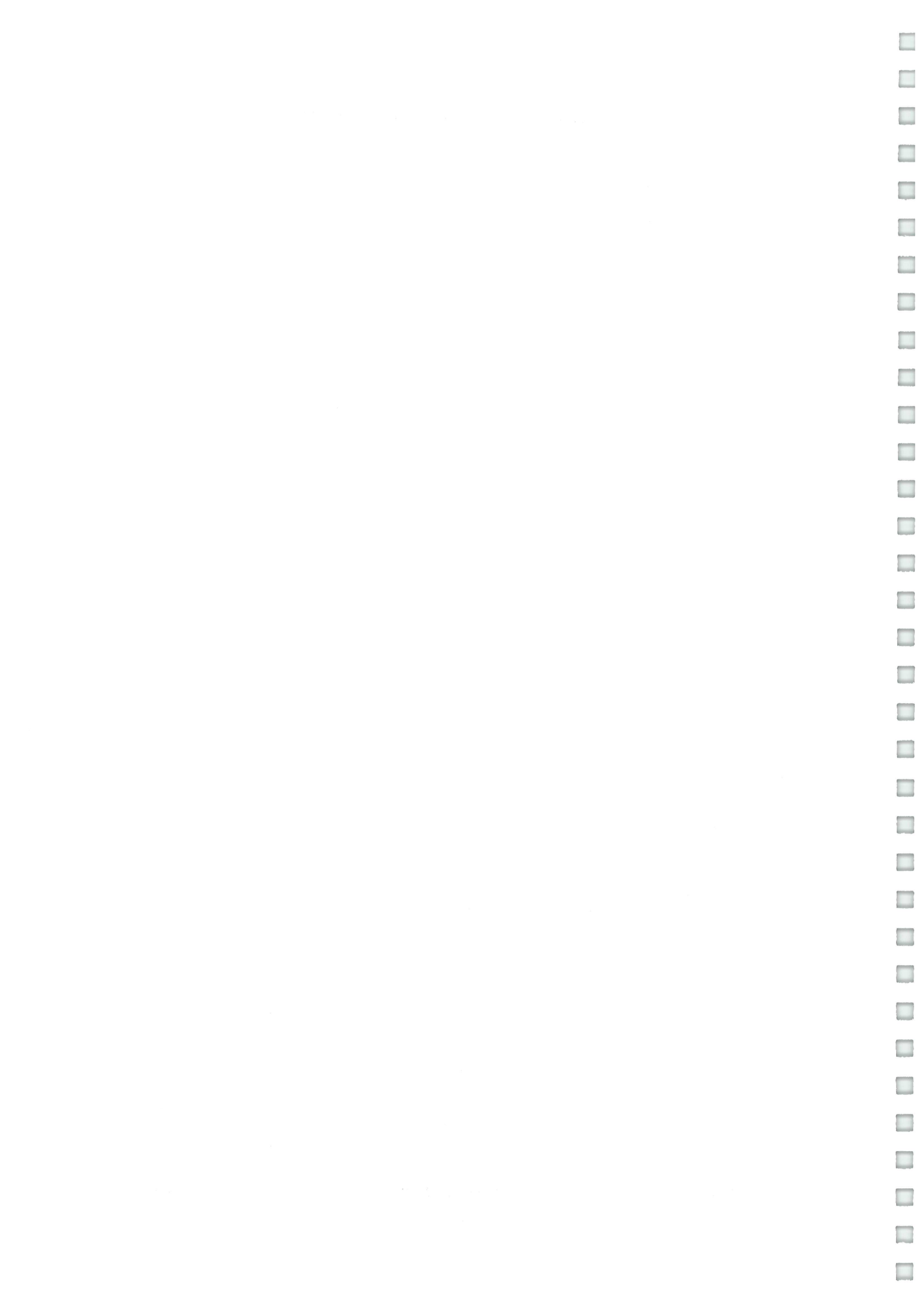
$V_{col}$  la vitesse d'impact du véhicule en m/s,

$S(m)$  la distance de projection du piéton en mètre,

$$M_r = \frac{m_{VL} + m_p}{m_{VL}},$$

et  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  et  $S_0$  des paramètres de régression.

Les deux tableaux ci-dessous donnent la valeur des coefficient de régression suivant le type de trajectoire post-impact du piéton, le niveau de confiance exigée et les conditions de chaussée (humide ou sèche).





Confidence level	Forward projection						Wrap projection			
	$\left( \frac{V_{col}(m/s)}{M_r} = A\sqrt{S(m)} + B \right)$						$\left( \frac{V_{col}(m/s)}{M_r} = C \times  S(m) - S_o ^D \right)$			
	Adults			Children			So	C	D	r
A	B	r	A	B	r					
Probable Lower	3.4	-1.7	0.99	3.4	-1.6	0.99	1.8	3.6	0.47	0.99
Probable Upper	3.7	-1.5	0.99	3.7	-1.3	0.99	1.4	4.1	0.46	0.99
Normal Lower	3.0	-1.7	0.99	3.0	-1.5	0.99	1.7	2.8	0.5	0.99
Normal Upper	4.0	-1.3	0.99	4.0	-1.1	0.99	1.2	4.6	0.46	0.99
Overall Lower	2.6	-1.4	0.99	2.6	-1.3	0.99	1.1	2.1	0.53	0.99
Overall Upper	4.3	-1.2	0.99	4.3	-0.9	0.99	1.2	5.0	0.46	0.99

FIGURE 34 – Vitesse d’impact du véhicule en fonction de la distance de projection sur chaussée sèche avec  $M_r$  connue.

Confidence level	Forward projection						Wrap projection			
	$\left( \frac{V_{col}(m/s)}{M_r} = A\sqrt{S(m)} + B \right)$						$\left( \frac{V_{col}(m/s)}{M_r} = C \times  S(m) - S_o ^D \right)$			
	Adults			Children			So	C	D	r
A	B	r	A	B	r					
Probable Lower	3.0	-1.4	0.99	3.0	-1.4	0.99	1.6	3.2	0.47	0.99
Probable Upper	3.3	-1.1	0.99	3.3	-1.1	0.99	1.2	3.7	0.47	0.99
Normal Lower	2.6	-1.2	0.99	2.6	-1.3	0.99	1.2	2.3	0.52	0.99
Normal Upper	3.5	-1.0	0.99	3.6	-0.9	0.99	1.0	4.1	0.47	0.99
Overall Lower	2.2	-0.8	0.99	2.2	-1.1	0.99	0.6	1.8	0.54	0.99
Overall Upper	3.8	-0.9	0.99	3.8	-0.8	0.99	1.1	4.6	0.46	0.99

FIGURE 35 – Vitesse d’impact du véhicule en fonction de la distance de projection sur chaussée mouillée avec  $M_r$  connue.

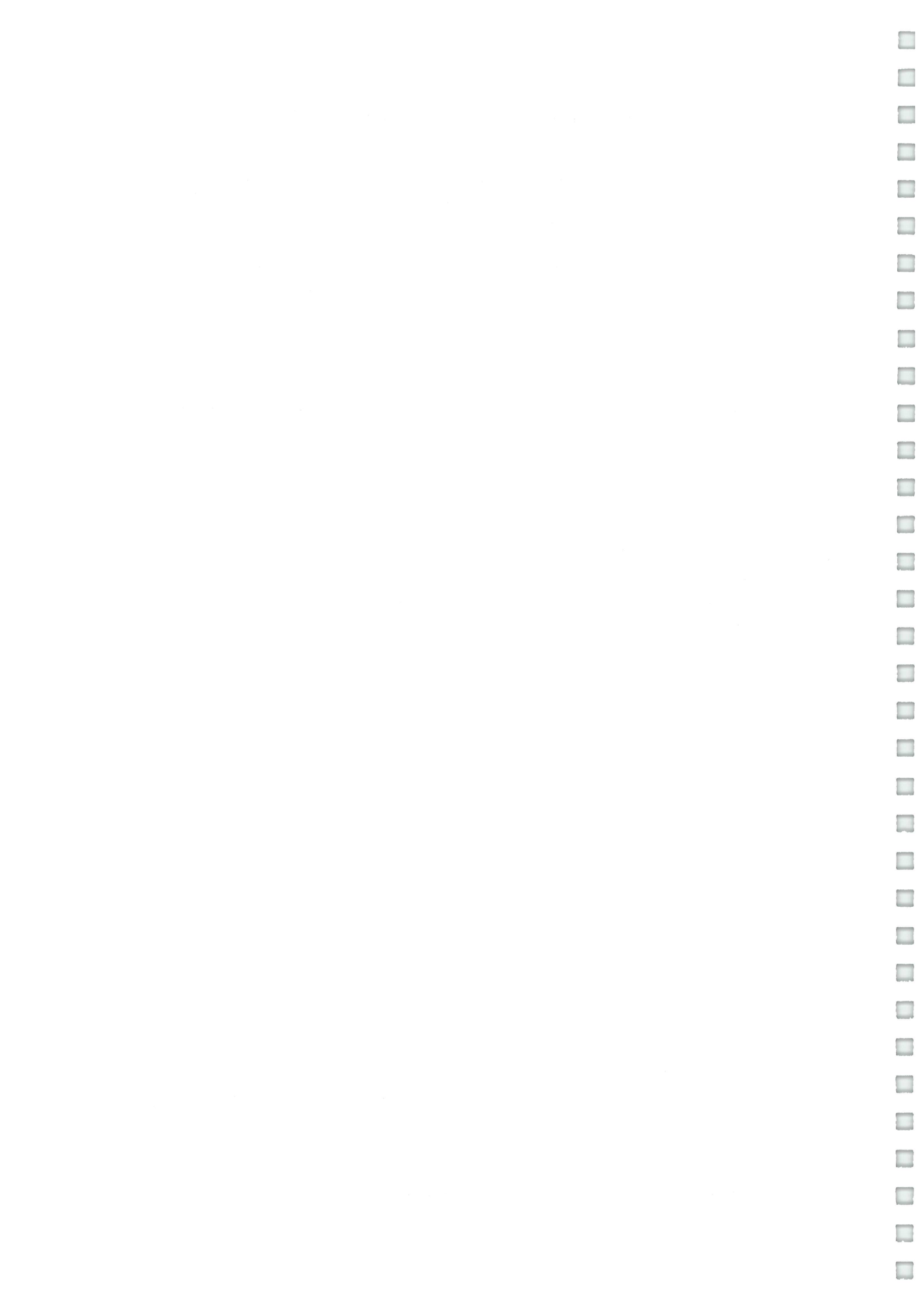
**Probable** : intervalle de prédiction [25<sup>ème</sup> centile, 75<sup>ème</sup> centile ]

**Normal** : intervalle de prédiction [2.5<sup>ème</sup> centile, 97.5<sup>ème</sup> centile ]

**Overall** : intervalle de prédiction [0.1<sup>ème</sup> centile, 99.9<sup>ème</sup> centile ]

## 9.4 Validation via la modélisation multicorps avec PC CRASH

Les modèles simples basés sur la physique et les modèles empiriques permettent de donner un intervalle raisonnable dans lequel se situe la vitesse d’impact du véhicule, ou encore une valeur moyenne de celle-ci. Lorsqu’on renseigne une base de données, il est préférable de donner la vitesse plutôt sous forme de valeur fixe que sous forme d’intervalle. Cependant la



valeur donnée doit être validée numériquement pour des raisons de rigueur et de cohérence scientifique. Cette validation peut être faite par le module multicorps de PC CRASH. Le recours au programme de simulation numérique permet de garantir la fiabilité des paramètres de reconstruction. Par ailleurs, l'utilisation de ce modèle multicorps fournit aux investigateurs un excellent outil pour corréler les segments corporels liés et les zones d'impact sur le véhicule par visualisation directe du résultat en trois dimensions. Le modèle permet de traiter différents types de piétons (taille et poids) dans différentes conditions (debout, marchant, courant, etc...).

### 9.4.1 Validation du module piéton multicorps de PC CRASH

L'introduction de la modélisation en éléments multicorps dans PC CRASH a été validée aussi bien d'un point de vue théorique qu'expérimental (30 crashes tests) [20]. En 2000, MOSER [21] montre en comparant les données des simulations PC CRASH de collisions véhicule/piéton, et des données empiriques, que le modèle est validé pour tout type de forme avant de véhicule et pour toute gamme de vitesse.

### 9.4.2 Description du modèle

Un piéton inséré dans le logiciel PC CRASH est un ensemble de 24 éléments multicorps représentant chaque segment corporel du corps humain relié par 13 liaisons que l'on appelle encore **joint**.

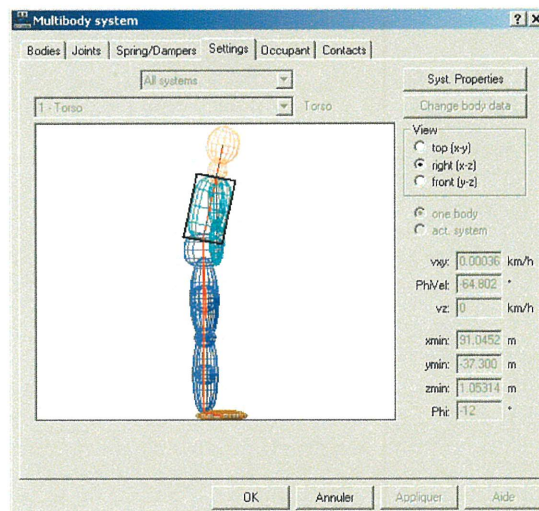
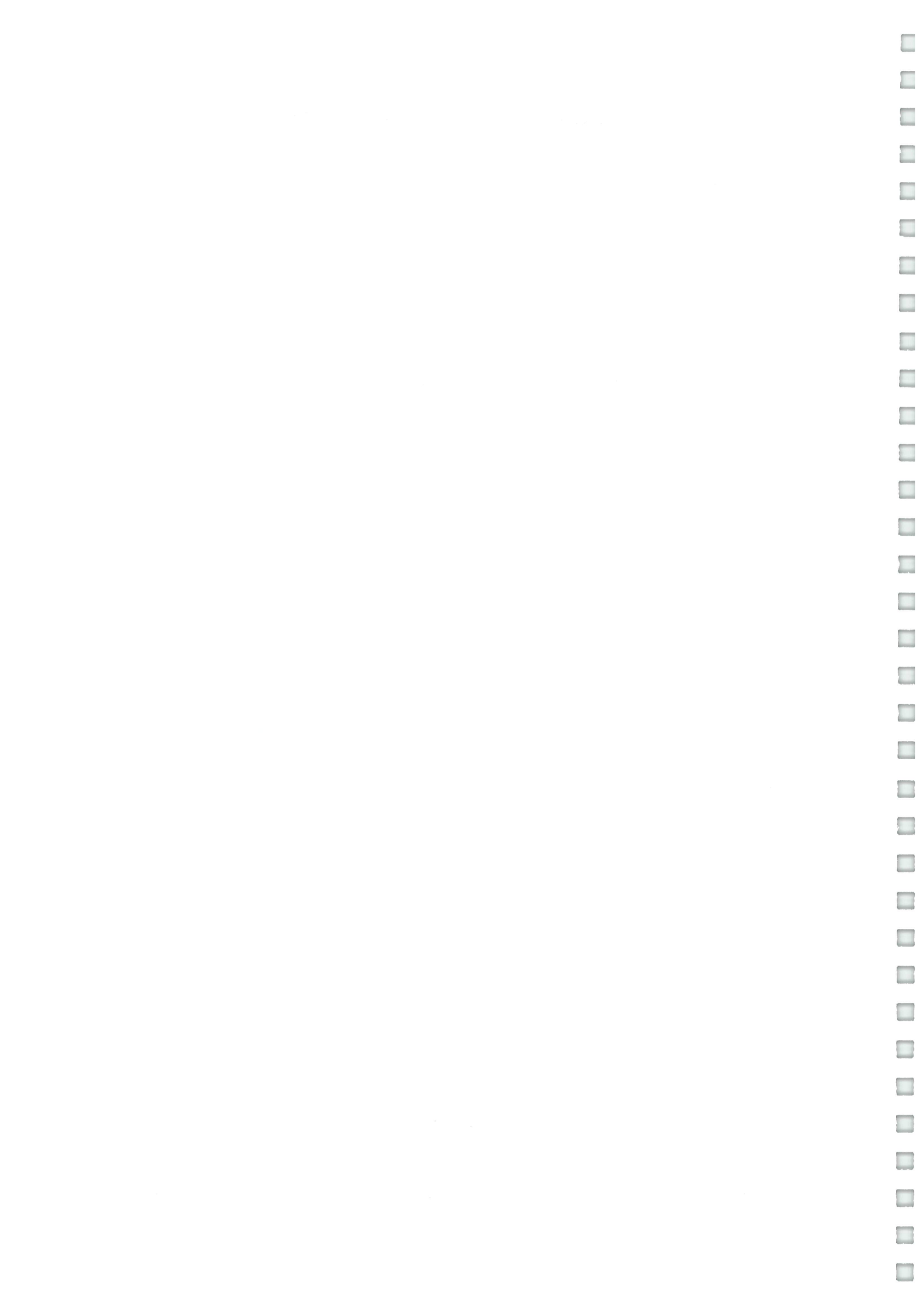


FIGURE 36 – Vue d'un piéton en éléments multicorps dans PC CRASH .

### 9.4.3 Propriétés de chaque élément

Chaque ensemble multibody est entièrement paramétrable physiquement et géométriquement aussi bien au niveau des ellipsoïdes et des joints de liaison.



### 9.4.3.1 Géométrie

Chaque élément est modélisé par une **ellipsoïde**<sup>7</sup> de degré  $n$  de demi axes  $a$ ,  $b$  et  $c$ .

$$\frac{|x|^n}{a^n} + \frac{|y|^n}{b^n} + \frac{|z|^n}{c^n} = 1 \quad (51)$$

Plusieurs types d'ellipsoïdes existent :

- $a = b$  et  $b = c$  : sphère de rayon  $a$ ,
- $a = b$  et  $b > c$  : ellipsoïde oblate (forme "aplatie"),
- $a = b$  et  $b < c$  : ellipsoïde prolata (forme "allongé"),
- $a > b$  et  $b > c$  : ellipsoïde scalène ("trois côtés inégaux").

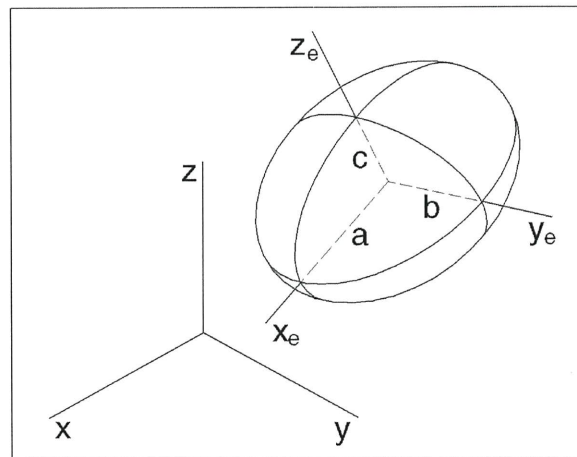


FIGURE 37 – Vue d'une ellipsoïde de degré  $n$  issue de [15].

### 9.4.3.2 Masse et moment d'inertie

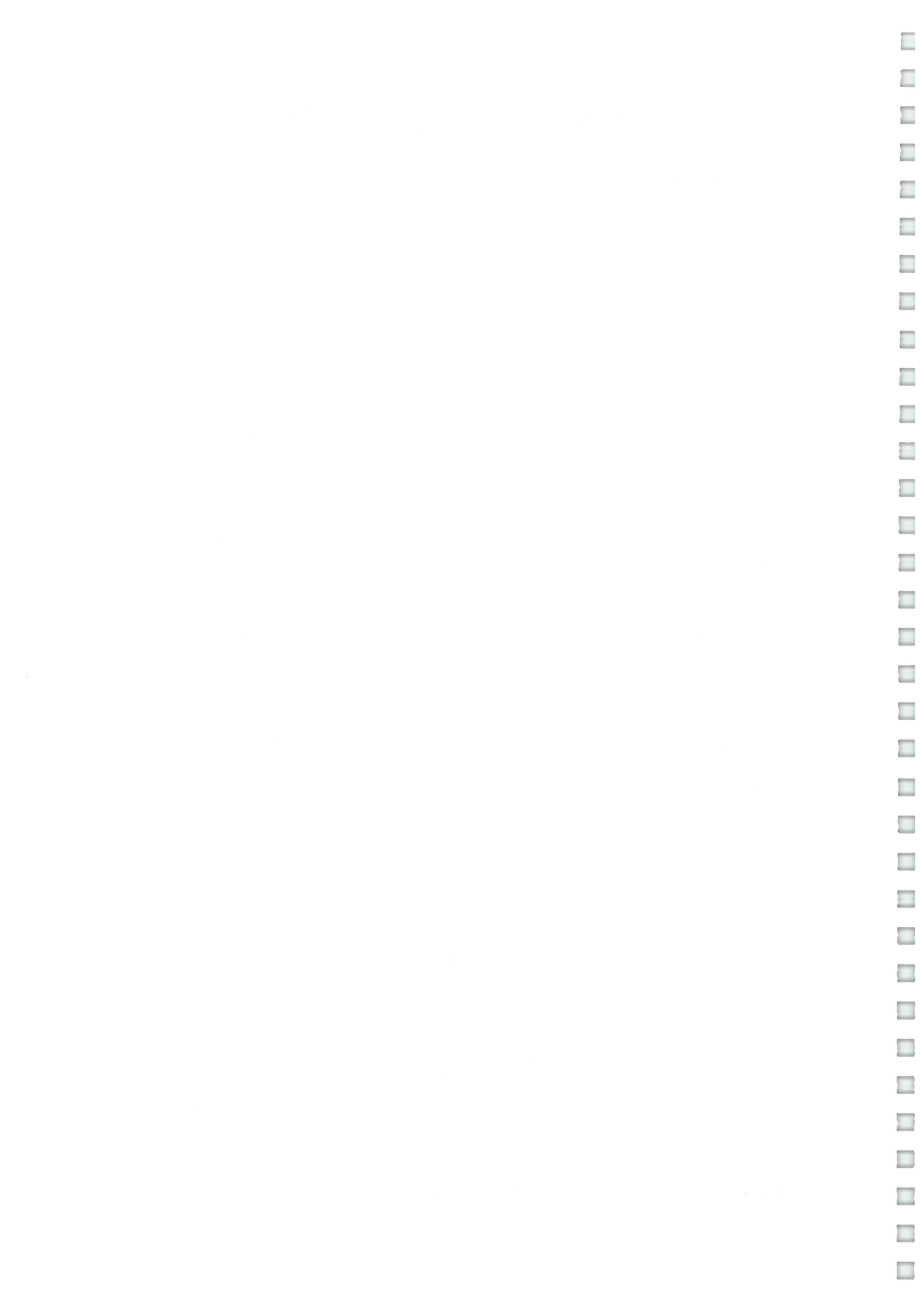
La masse et le moment d'inertie sont paramétrables pour chaque ellipsoïde. La matrice d'inertie d'une ellipsoïde s'écrit par défaut :

$$\begin{pmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m \cdot \frac{b^2 + c^2}{5} & 0 & 0 \\ 0 & m \cdot \frac{a^2 + c^2}{5} & 0 \\ 0 & 0 & m \cdot \frac{a^2 + b^2}{5} \end{pmatrix} \quad (52)$$

### 9.4.3.3 Coefficient de raideur

Un coefficient de raideur pour chaque élément multicorps peut être spécifié (N/m). Ce paramètre est notamment utilisé lors du calcul des contacts de l'ellipsoïde avec l'environnement.

7. Solide engendré par révolution d'une ellipse autour de ces axes





#### 9.4.3.4 Coefficient de restitution

Ce paramètre permet de modéliser l'élasticité de l'ellipsoïde pour les contacts au sol ( $k$ ).

#### 9.4.3.5 Coefficient de frottement

Deux coefficients de frottement peuvent être paramétrés :

- le premier est celui concernant les contacts ellipsoïde contre véhicule ( $\mu_{veh}$ ),
- et le second pour les contacts ellipsoïde/ellipsoïde ou ellipsoïde/sol ( $\mu_p$ ).

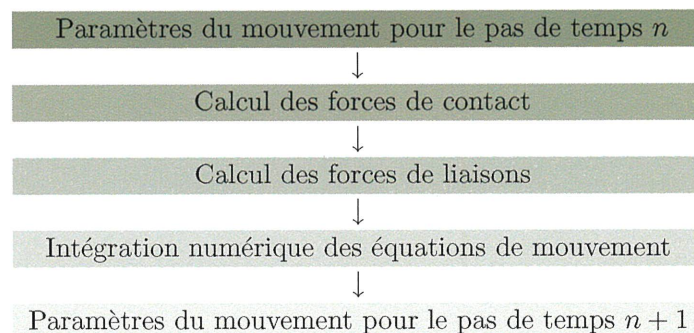
### 9.4.4 Géométrie du véhicule

Étant donné que la forme avant du véhicule a une influence considérable sur la trajectoire post-impact du piéton, il convient d'effectuer un paramétrage précis de sa géométrie (chemin : `Vehicule`/`Vehicule Settings`/`Vehicule Shape`) (confer FIG. 39 page 75 en annexe).

Lorsque l'on possède une carrosserie 3D-DXF, celle-ci peut être utilisée pour modéliser la géométrie du véhicule. Ces carrosseries sont formées d'un maillage de multiples plans triangulaires utilisés pour les calculs de contacts véhicule/piéton. Lorsqu'une carrosserie est insérée, il convient de cocher la case `3D Dxf car contact` dans le sous-menu `settings` du menu `multibody system`. Seuls les formats suivants peuvent être utilisés : x61, FCE, et idf (pas DFF). Il est à noter que l'utilisation de carrosserie 3D rallonge considérablement le temps de calcul de la simulation.

### 9.4.5 Fonctionnement du modèle

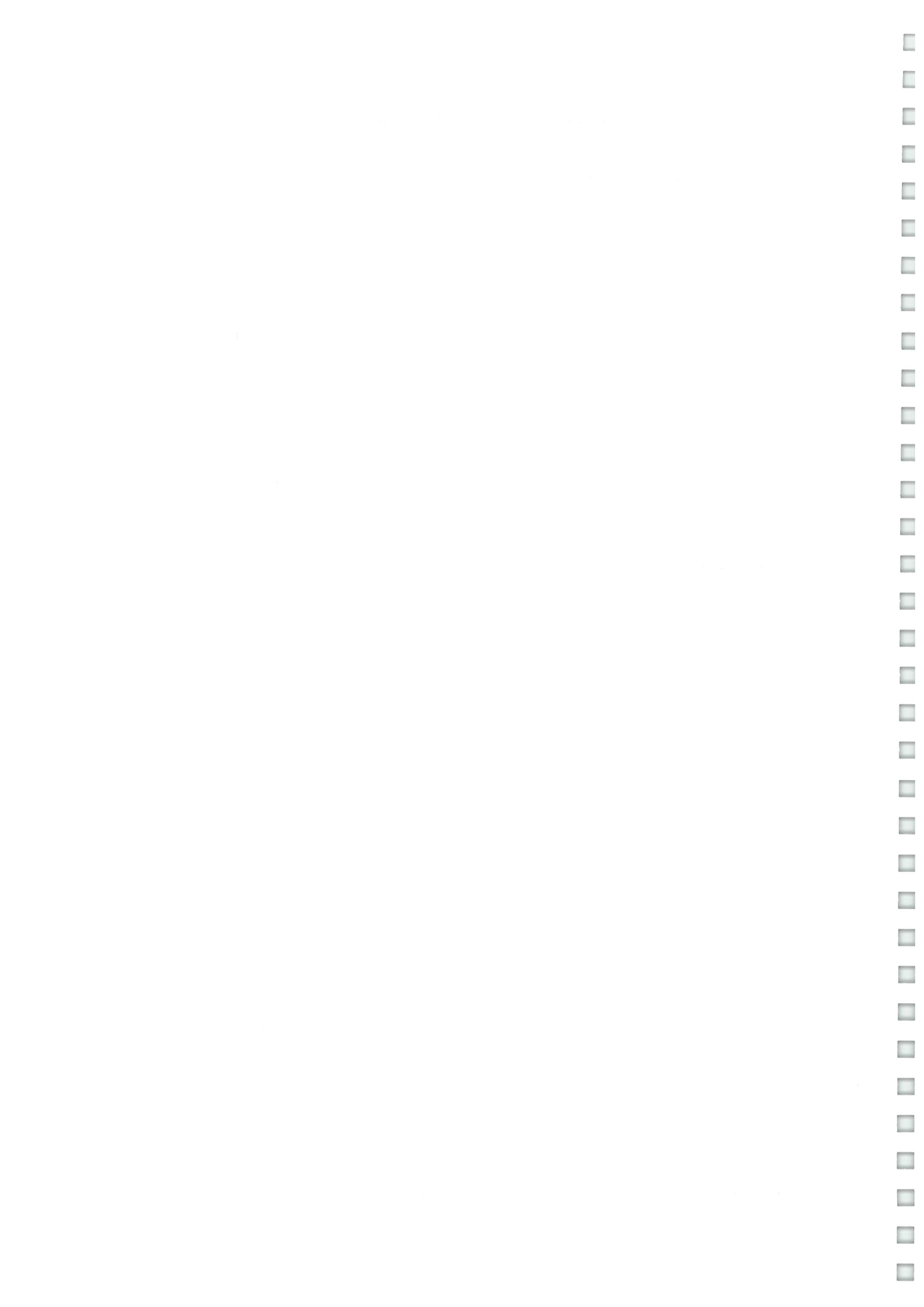
Lors d'une simulation, à chaque pas de temps, les forces extérieures sont calculées pour chaque élément multi-corps (gravité, forces de contact, forces de frottement, forces de liaison). Une fois que les forces extérieures sont calculées, le mouvement de chaque ellipsoïde est calculé indépendamment par intégration numérique des équations de mouvement.



L'intégration numérique des équations de mouvement est réalisée par le biais de la méthode explicite d'euler<sup>8</sup> avec un pas d'intégration allant de 0.1 à 1 ms. Pour chaque ellipsoïde, la

8. Leonhard Paul Euler, né le 15 avril 1707 à Bâle et mort le 18 septembre 1783 à Saint-Pétersbourg, est un mathématicien et physicien suisse, qui fit d'importantes découvertes dans des domaines aussi variés que le calcul infinitésimal et la théorie des graphes.





nouvelle vitesse est calculée par :  $\dot{x}_{(t+\Delta t)} = \dot{x}_{(t)} + \ddot{x}_{(t)} \cdot \Delta t$  et la nouvelle position par :  
 $x_{(t+\Delta t)} = x_{(t)} + \dot{x}_{(t)} \cdot \Delta t + \ddot{x}_{(t)} \cdot \frac{\Delta t^2}{2}$ .

### 9.4.6 Manipulation du logiciel

En ce qui concerne les manipulations, il convient de lire la notice d'utilisation avant d'entreprendre une quelconque simulation. Même si l'utilisation du logiciel paraît "assez simple", son utilisation par des néophytes peut s'avérer dangereuse. Il est en effet indispensable de lire le manuel d'utilisation et les différentes publications *ad hoc* afin de connaître parfaitement son fonctionnement et les paramètres influant.

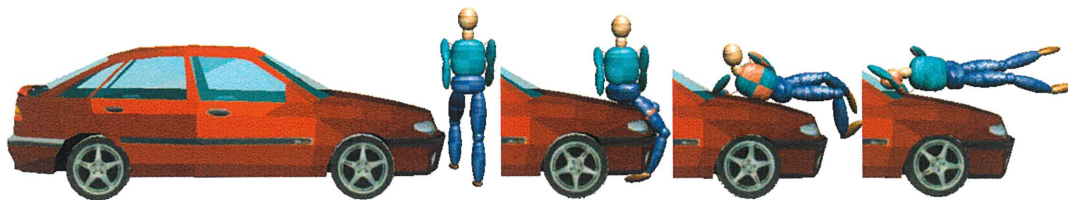


FIGURE 38 – Vue de la cinématique de contact véhicule/piéton dans PC CRASH .



# Chapitre 10

## Application de la méthodologie à un cas concret

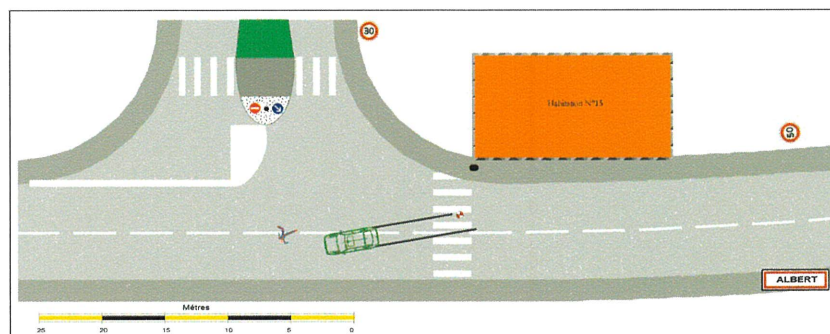
### 10.1 Accident 01013

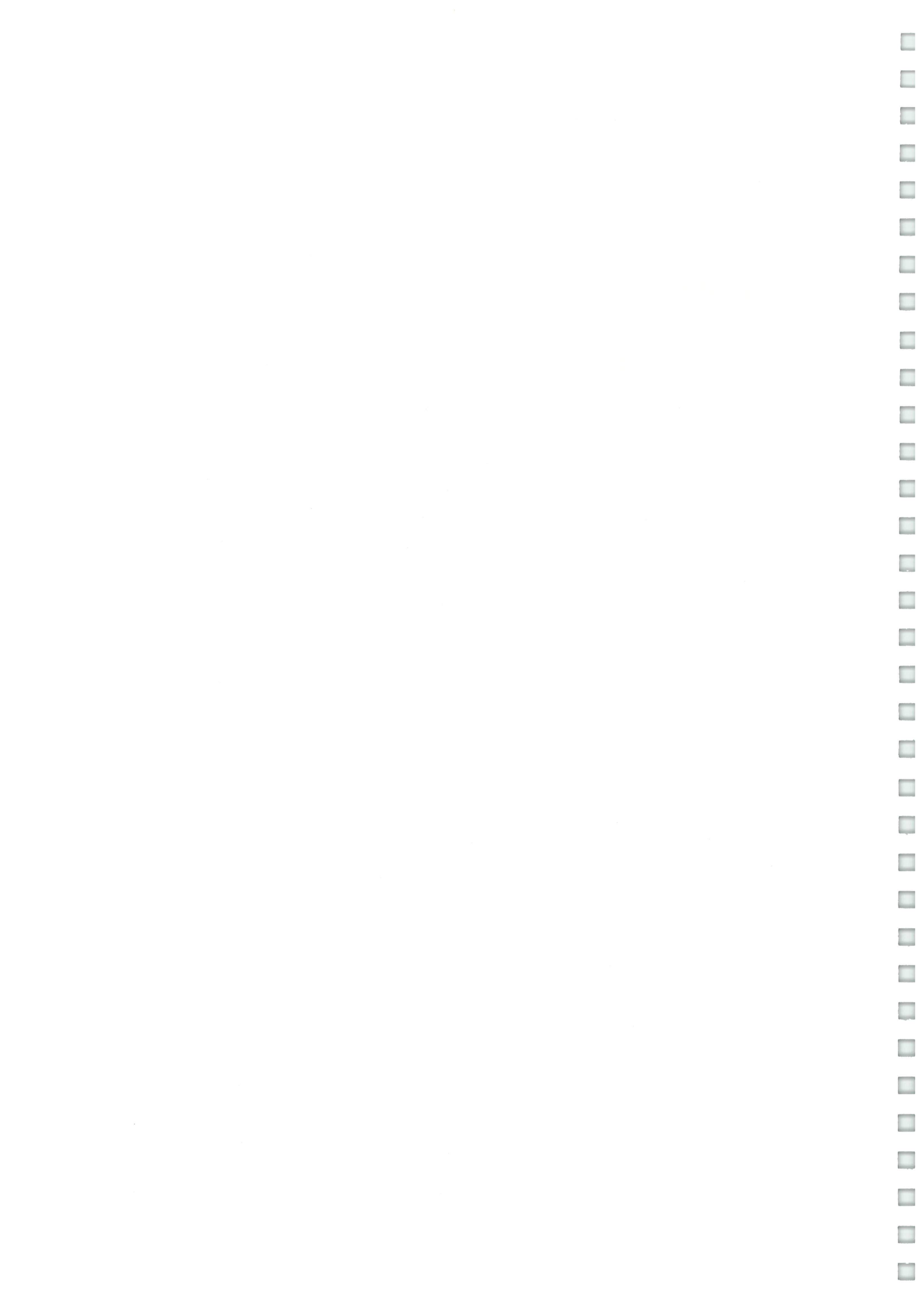
Afin de faciliter la compréhension de la méthodologie utilisée et présentée dans ce guide, nous donnons un exemple d'accident traité en EDA.

**Résumé de l'accident :** Le piéton Y entame sa traversée sur un passage protégé situé à proximité d'un intersection en forme de "T" puis se fait percuter par un véhicule venant de gauche.

Véhicule A	Seat Toledo 1.9 D (M.E.C. 04-1994)
Usager Y	Femme de 57 ans, Blessée grave
Situation	Renversement sur passage protégé
Infrastructure	Descente de 3 %, chaussée sèche $\mu = 0.8$
Luminosité	Jour
Vitesse réglementaire	50 km/h

**Plan :**





**Photos :**



**Données :**

Masse de la voiture :  $m_{VL} = 1110 \text{ kg}$

Masse du piéton :  $m_P = 50 \text{ kg}$

Distance totale de freinage :  $s_{B-E} = 8 \text{ m}$

Distance entre le point d'impact et la position résiduelle de la voiture :  $s_{K-E} = 7 \text{ m}$

Décélération moyenne du véhicule appliquée sur la distance  $s_{B-E}$  :  $a_m = 8 \text{ m/s}^2$

Temps de mise en pression :  $t_s = 0.4 \text{ s}$

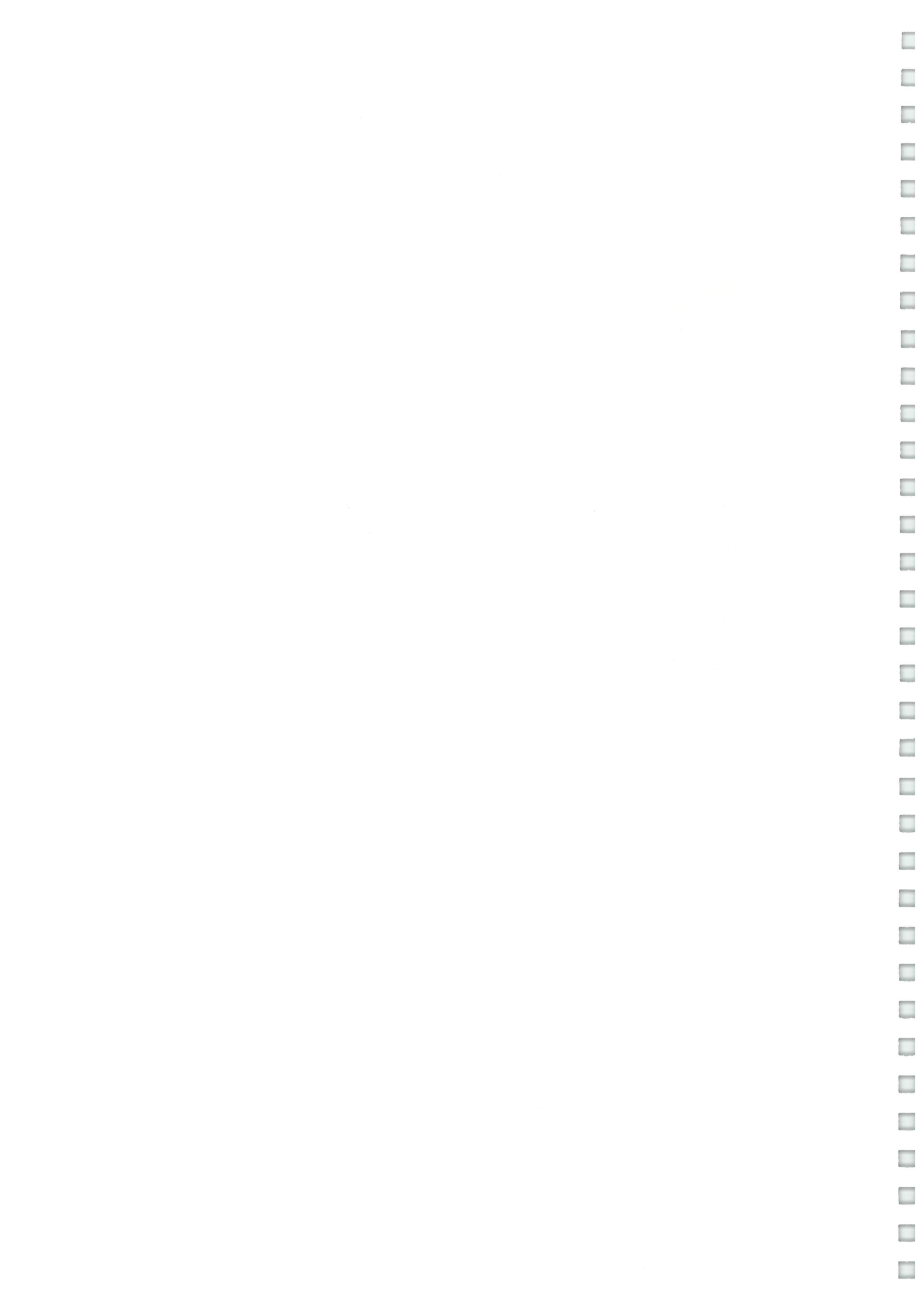
**10.1.1 Méthode simple :**

Nous utiliserons dans ce paragraphe la méthode utilisée au paragraphe 9.1.1.

**10.1.1.1 POST-COLLISION**

**Calcul de  $V_E$  :**

En théorie, la vitesse finale du véhicule ( $V_E$ ) est nulle si le véhicule est à l'arrêt à la fin des traces de freinage. Or le véhicule continue sa progression après le freinage "roues bloquées" sur une distance de 2.75 m plus loin. On peut considérer ici que la conductrice du véhicule A a relâché la pédale de frein et que nous sommes dans ce cas en freinage dégressif. Nous





prendrons donc une décélération proche de celle de la mise en pression ( $a = a_s = \frac{a_m}{2}$ ).

$$d = 2.75 \text{ m}$$

$$a = 4 \text{ m/s}^2$$

$$V_E = \sqrt{2 a d} = \sqrt{2 \cdot 4 \cdot 2.75} = \sqrt{22} = 4.69 \text{ m/s} = 16.89 \text{ km/h}$$

**Calcul de la vitesse de sortie de choc du véhicule A ( $V'_c$ ) :**

$$s_{K-E} = 7 \text{ m}$$

$$a_m = 8 \text{ m/s}^2$$

$$V'_c = \sqrt{V_E^2 + 2 a_m s_{K-E}} = \sqrt{4.69^2 + 2 \cdot 8 \cdot 7} = \sqrt{133.99} = 11.57 \text{ m/s} = 41.67 \text{ km/h}$$

### 10.1.1.2 COLLISION

**Calcul de la vitesse d'entrée de choc du véhicule A ( $V_c$ ) :**

Compte tenu de la géométrie avant du véhicule A en forme de trapèze, nous prendrons :  $IF = 0.7$  (facteur d'impact).

$$V_c = \left(1 + \frac{m_P}{m_{VL}} \cdot IF\right) \cdot V'_c = \left(1 + \frac{50}{1110} \cdot 0.7\right) \cdot 11.57 = 11.93 \text{ m/s} = 42.96 \text{ km/h}$$

**Calcul de la variation de vitesse du véhicule A ( $\Delta V$ ) :**

$$\Delta V = V_c - V'_c = 11.93 - 11.57 = 0.36 \text{ m/s} = 1.3 \text{ km/h}$$

Remarque : La variation de vitesse est faible car la masse du piéton est presque négligeable comparativement à la masse de la voiture.

### 10.1.1.3 PRE-COLLISION

**Phase de freinage effectif :**

**Calcul de la vitesse véhicule A au début du freinage effectif ( $V_B$ ) :**

$$s_B = s_{B-E} - s_{K-E} = 1 \text{ m}$$

$$a_m = 8 \text{ m/s}^2$$

$$V_B = \sqrt{V_c^2 + 2 a_m (s_{B-E} - s_{K-E})} = \sqrt{11.93^2 + 2 \cdot 8 \cdot 1} = \sqrt{158.32} = 12.58 \text{ m/s} = 45.29 \text{ km/h}$$

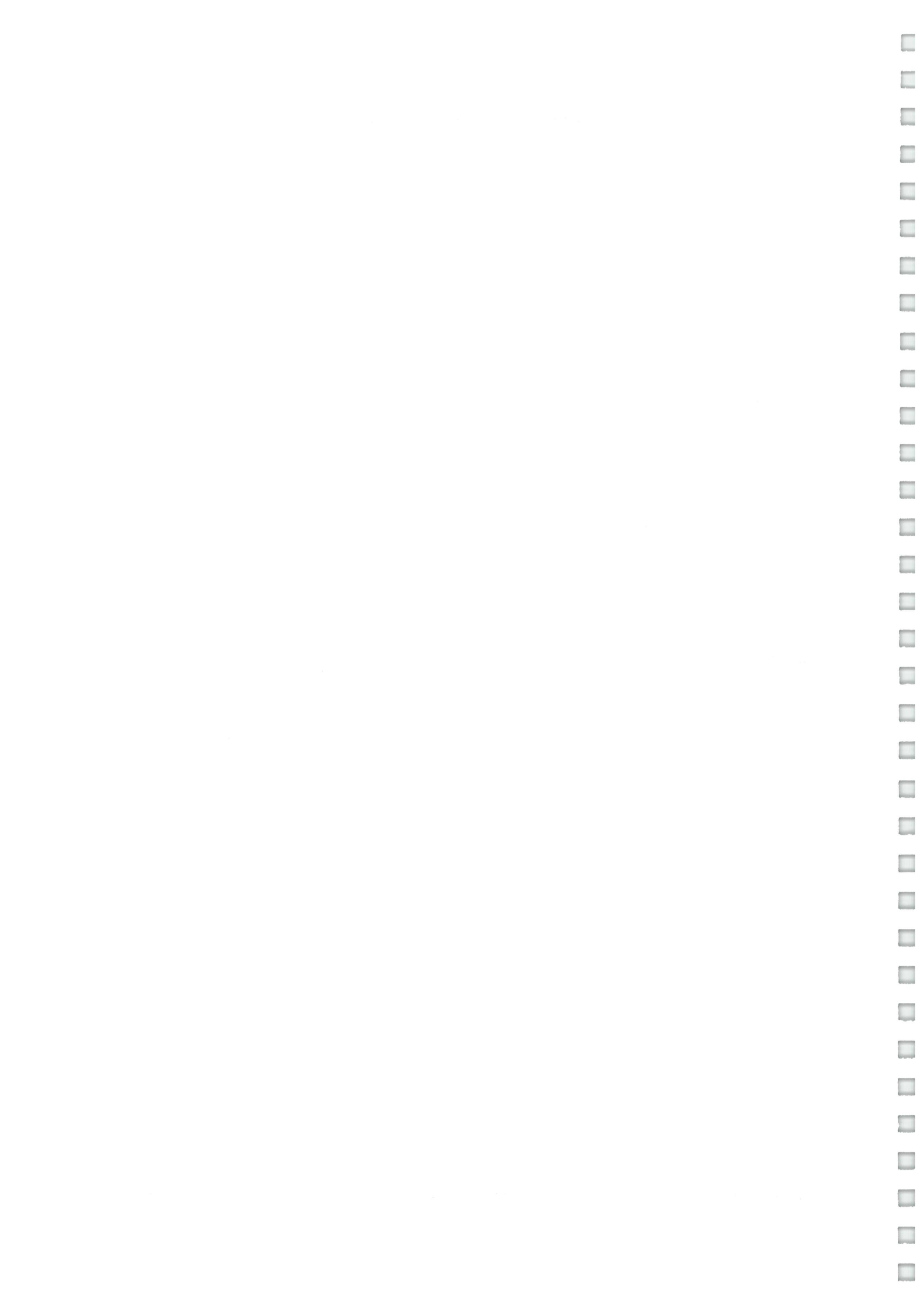
**Calcul de  $t_B$  :**

$$t_B = \frac{V_B - V_c}{a_m} = \frac{12.58 - 11.93}{8} = 0.08 \text{ s}$$

**Phase de mise en pression :**

**Calcul de la vitesse du véhicule A au début du temps de mise en pression  $V_s$  :**

$$t_s = 0.4 \text{ s}$$



$$a_s = \frac{a_m}{2} = \frac{8}{2} = 4 \text{ m/s}^2$$

$$V_s = \frac{a_m}{2} \cdot t_s + V_B = 4 \cdot 0.4 + 12.58 = 14.18 \text{ m/s} = 51.04 \text{ km/h}$$

Calcul de la distance parcourue par A durant la phase de la MEP  $s_s$  :

$$s_s = \frac{V_s^2 - V_B^2}{2 \cdot \frac{a_m}{2}} = \frac{14.18^2 - 12.58^2}{2} = 5.35 \text{ m}$$

Phase de réaction :

Calcul de la distance parcourue par A durant la phase de réaction  $s_r$  :

$$t_r = 0.8 \text{ s (temps moyen pour un conducteur } \lambda)$$

$$V_r = V_s = 14.18 \text{ m/s}$$

$$s_r = t_r \cdot V_r = 0.8 \cdot 14.18 = 11.34 \text{ m}$$

De la réaction à la collision :

$$s_{R-K} = s_r + s_s + s_B = 11.34 + 5.35 + 1 = 17.69 \text{ m}$$

$$t_{R-K} = t_r + t_s + t_B = 0.8 + 0.4 + 0.08 = 1.28 \text{ s}$$

Temps mis par le piéton Y pour effectuer  $s_{F1}$  :

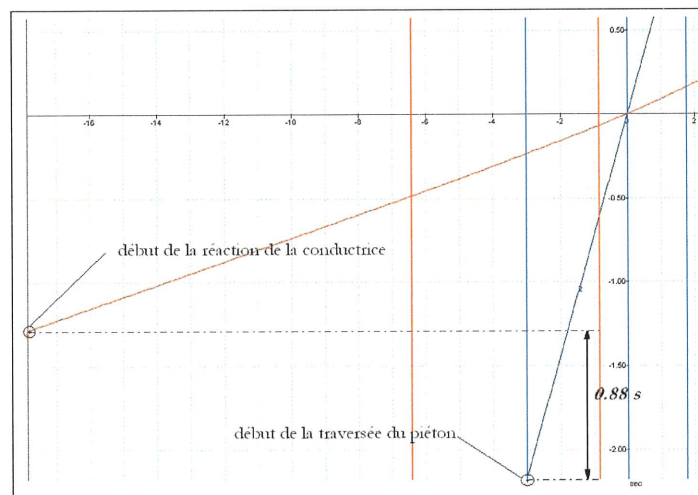
$s_{F1}$  est la distance couverte par le piéton en pré-collision.

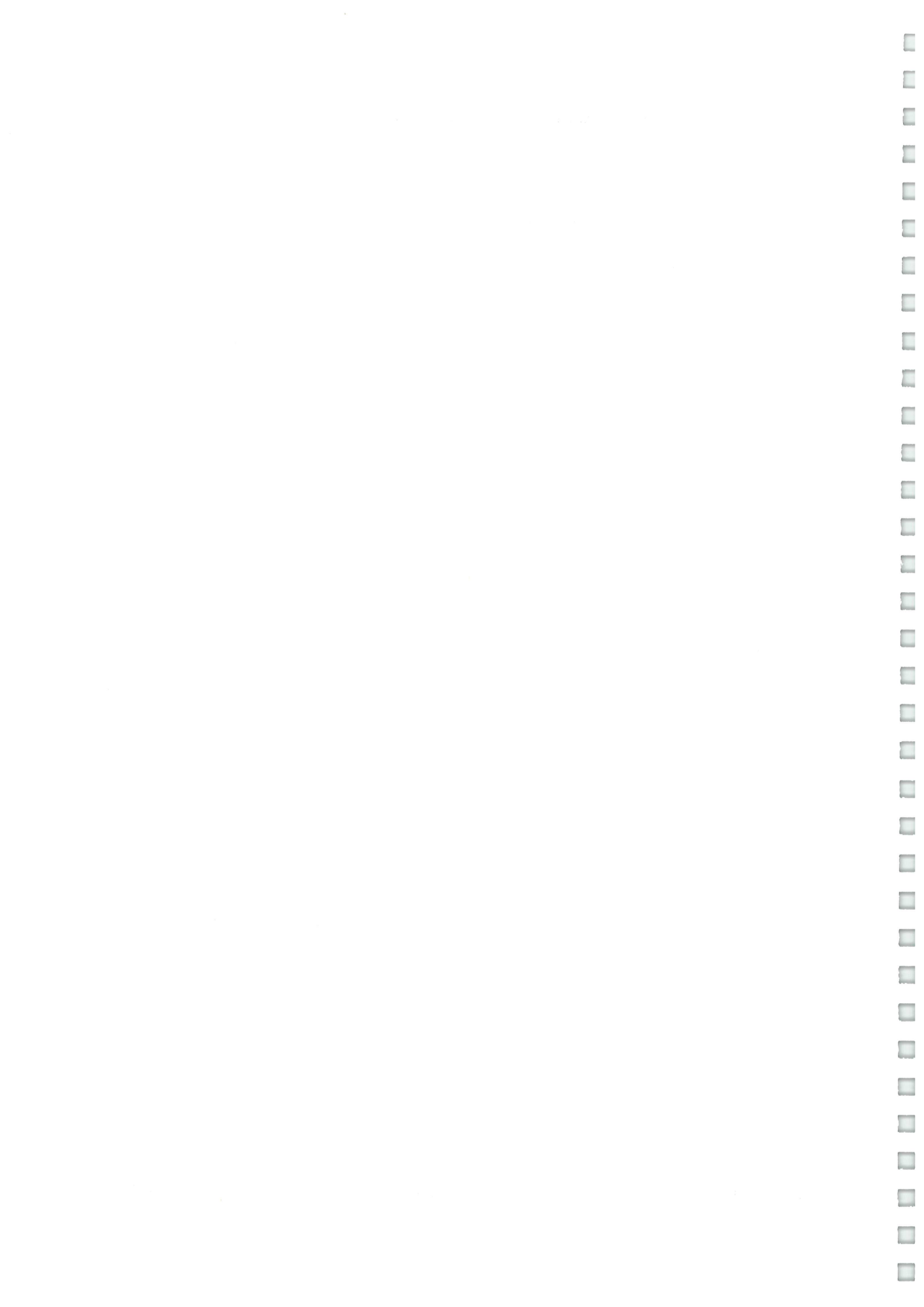
Le piéton marche normalement pour traverser et d'après les abaques, on peut prendre :

$$V_F = 5 \text{ km/h.}$$

$$t = \frac{s_{F1}}{V_F} = \frac{3}{1.39} = 2.16 \text{ s}$$

Suivant les données de la reconstruction cinématique, la conductrice du véhicule réagit 0.88 s (2.16-1.28) après le danger (début de la traversée du piéton). Un diagramme **Distance-Temps** permet de mieux visualiser ce décalage.



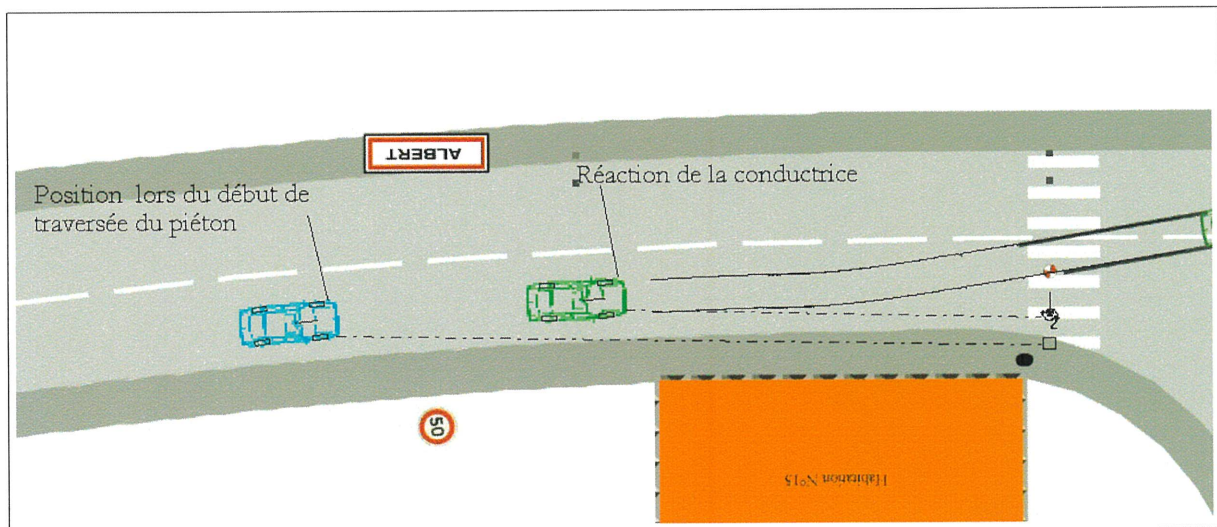


**Comment expliquer le décalage de la réaction de la conductrice par rapport au danger ?** Lors de l'entretien, la conductrice affirme que son sac à main situé sur le siège passager est tombé sur le plancher et qu'elle s'est penchée pour le récupérer. Lorsqu'elle regarde de nouveau la route, elle aperçoit alors le piéton, se déporte sur la gauche et freine en urgence. Ainsi, lorsque le piéton débute la traversée, la conductrice ne regarde pas la route. Le décalage de la réaction de la conductrice par rapport au début du danger s'explique alors simplement par une tâche annexe de la part de la conductrice.

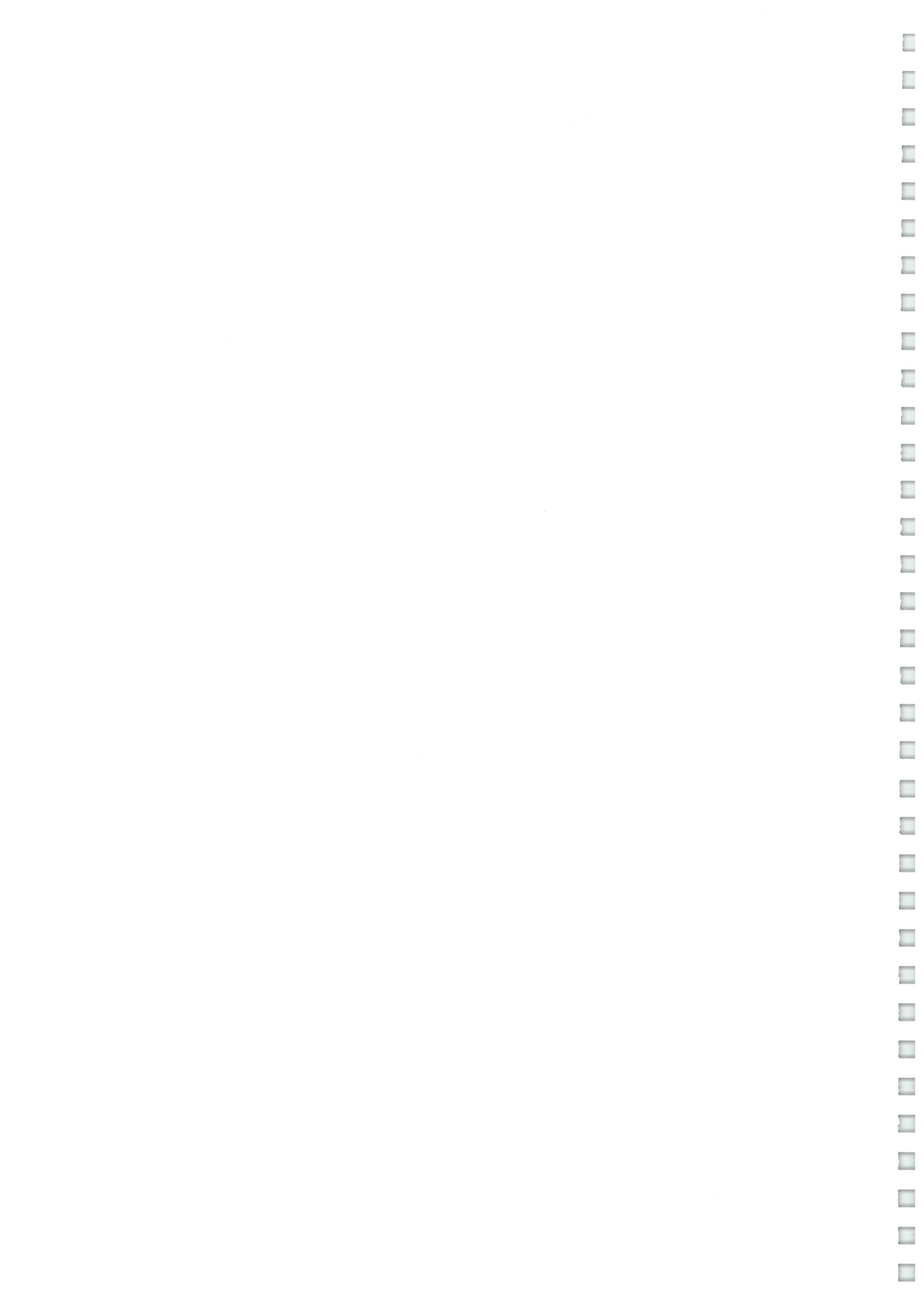
**Évitement. Où était le véhicule lors du début de la traversée du piéton ? La conductrice aurait-elle pu éviter l'accident si elle avait réagi au moment du début de la traversée du piéton ??**

$$s_{\Delta t} = V_r \cdot \Delta t = 14.18 \cdot 0.88 = 12.47 \text{ m}$$

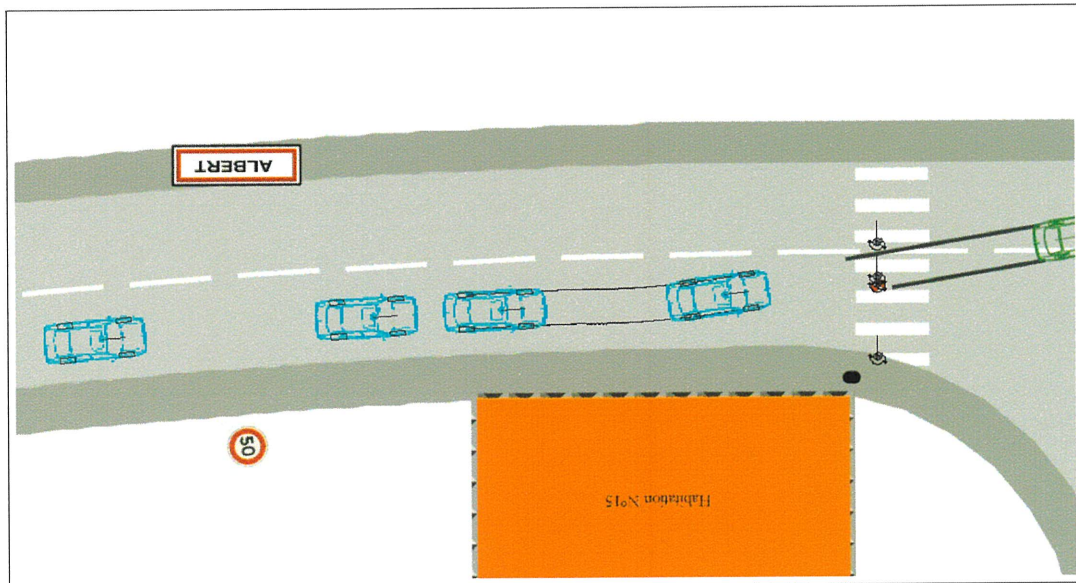
$$\text{Distance par rapport au point de choc : } s = s_{\Delta t} + s_{R-K} = 17.69 + 12.47 = 30.16 \text{ m}$$



Les calculs montrent alors que si la conductrice réagit lorsqu'elle se situe à 30.16 m du point de choc, elle dispose donc de 12.47 m pour freiner. Avec  $V_B = 12.58 \text{ m/s} = 45.29 \text{ km/h}$  et  $s_B = s - s_r - s_s = 30.16 - 11.34 - 5.35 = 13.47 \text{ m}$ , la conductrice pouvait arrêter son véhicule avant la collision. En effet, la distance d'arrêt est de 9.89 m à  $V=45.29 \text{ km}$  et  $a=8 \text{ m/s}^2$ . L'analyse de la pré-collision permet de conclure sciemment que si la conductrice n'avait pas effectué de tâche annexe lors de la collision, elle aurait pu arrêter son véhicule et donc éviter la collision.







### 10.1.2 Modélisation type “Fall and Slide” de Collins

Données :

$$D_p = 14 \text{ m}$$

$$\mu_p = 0,66$$

$$H_2 = 0,9 \text{ m}$$

$$\text{On a : } \frac{1}{2 \cdot \mu_p \cdot g} \cdot V_p^2 + \sqrt{\frac{2 \cdot H_2}{g}} \cdot V_p - D_p = 0$$

On voit que l'équation ci-dessus est une équation du second degré de la forme :

$$A \cdot V_p^2 + B \cdot V_p + C = 0$$

La résolution est triviale.

$$A = \frac{1}{2 \cdot \mu_p \cdot g} = \frac{1}{2 \cdot 0,66 \cdot 9,81} = 0,0772$$

$$B = \sqrt{\frac{2 \cdot H_2}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,9}{9,81}} = 0,4283$$

$$C = -D_p = -14$$

$$\text{Discriminant : } \Delta = B^2 - 4 \cdot A \cdot C = 4,50$$

$$\text{Solution (positive) : } V_p = \frac{-B + \sqrt{\Delta}}{2 \cdot A} = 10,97 \text{ m/s} = 39,50 \text{ km/h}$$

$$\text{En utilisant l'efficacité de projection : } PE = \frac{m_{VL}}{m_{VL} + m} = \frac{1110}{1110 + 50} = 0,95 = 95\%$$

$$V_c = \frac{1}{PE} \cdot V_p = \frac{1}{0,95} \cdot 39,50 = 41,57 \text{ km/h}$$





### 10.1.3 Modélisation simple dite “Fall, bouncing and Sliding” de Searle and Searle

Données :

$$D_p = 14 \text{ m}$$

$$\mu_p = 0,66$$

Les formules de SEARLE et SEARLE permettent de calculer une vitesse mini et maxi de projection du piéton.

Minimum :

$$V_{p(\min)} = \sqrt{\frac{2 \mu_p g \cdot (D_1 + D_2)}{1 + \mu_p^2}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0.66 \cdot 9.81 \cdot 14}{1 + 0.66^2}} = 11.24 \text{ m/s} = 40.45 \text{ km/h}$$

Maximum :

$$V_{p(\max)} = \sqrt{2 \mu_p g \cdot (D_1 + D_2)} = \sqrt{2 \cdot 0.66 \cdot g \cdot 14} = 13.46 \text{ m/s} = 48.47 \text{ km/h}$$

En utilisant l'efficacité de projection :  $PE = \frac{m_{VL}}{m_{VL} + m} = \frac{1110}{1110 + 50} = 0.95 = 95\%$

$$V_{c(\min)} = \frac{1}{PE} \cdot V_p = \frac{1}{0.95} \cdot 40.45 = 42.58 \text{ km/h}$$

$$V_{c(\max)} = \frac{1}{PE} \cdot V_p = \frac{1}{0.95} \cdot 48.47 = 51.02 \text{ km/h}$$

### 10.1.4 Modélisation simple dite “Fall, bouncing and Sliding” de Searle

Données :

$$D_p = 14 \text{ m}$$

$$\mu_p = 0,66$$

$$H_2 = 0,9 \text{ m}$$

Les formules de SEARLE permettent de calculer une vitesse mini et maxi de projection du piéton.

Minimum :

$$V_{p(\min)} = \sqrt{\frac{2 \mu_p g \cdot [(D_1 + D_2) + \mu_p H_2]}{1 + \mu_p^2}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0.66 \cdot 9.81 \cdot (14 + 0.66 \cdot 0.9)}{1 + 0.66^2}} = 11.47 \text{ m/s} = 41.30 \text{ km/h}$$

Maximum :

$$V_{p(\max)} = \sqrt{2 \mu_p g \cdot [(D_1 + D_2) + \mu_p H_2]} = \sqrt{2 \cdot 0.66 \cdot g \cdot (14 + 0.66 \cdot 0.9)} = 13.75 \text{ m/s} = 49.49 \text{ km/h}$$

En utilisant l'efficacité de projection :  $PE = \frac{m_{VL}}{m_{VL} + m} = \frac{1110}{1110 + 50} = 0.95 = 95\%$



$$V_{c(min)} = \frac{1}{PE} \cdot V_p = \frac{1}{0.95} \cdot 41.30 = 43.48 \text{ km/h}$$

$$V_{c(max)} = \frac{1}{PE} \cdot V_p = \frac{1}{0.95} \cdot 49.49 = 52.09 \text{ km/h}$$

En prenant en compte la pente de -3 %, on trouve :

$$V_{c(min)} = 43.01 \text{ km/h}$$

$$V_{c(max)} = 51.53 \text{ km/h}$$

### 10.1.5 Modélisations empiriques

Concernant les modélisations analytiques, nous donnons les résultats des calculs de façon synthétique dans le tableau ci-après (*confer* TABLE. 8 page 77), ceci afin de ne pas surcharger le document.

### 10.1.6 Modélisation multi corps avec PC CRASH

Afin d'assurer la cohérence de la simulation numérique, nous avons utilisé et paramétré les éléments suivants :

- Plan à l'échelle avec position du point de choc et les positions finales des deux impliqués (*POI* et *POR*). Traces de freinage.
- Géométrie avant du véhicule. Les carrosseries 3D n'existant pas pour ce type de véhicule, nous avons mesuré et renseigné l'ensemble des côtes utiles pour le véhicule.

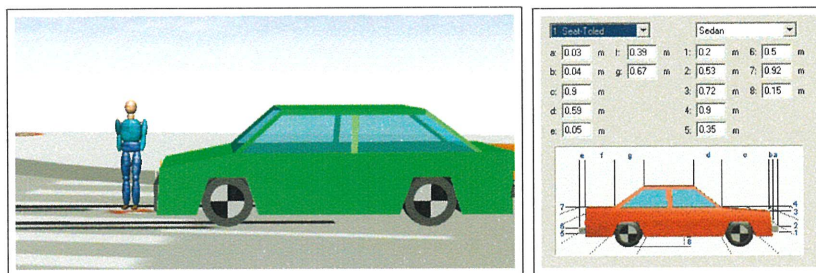
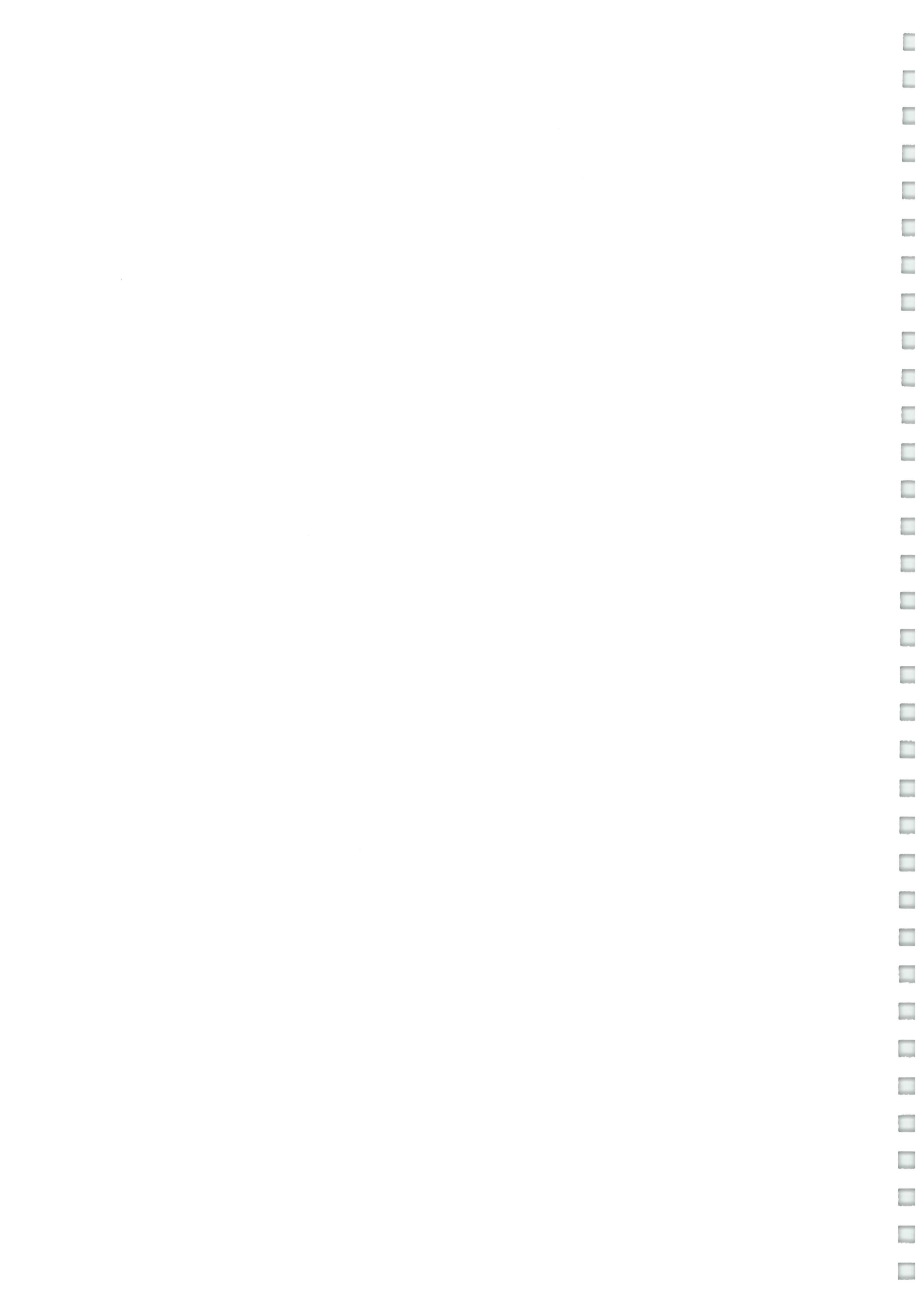
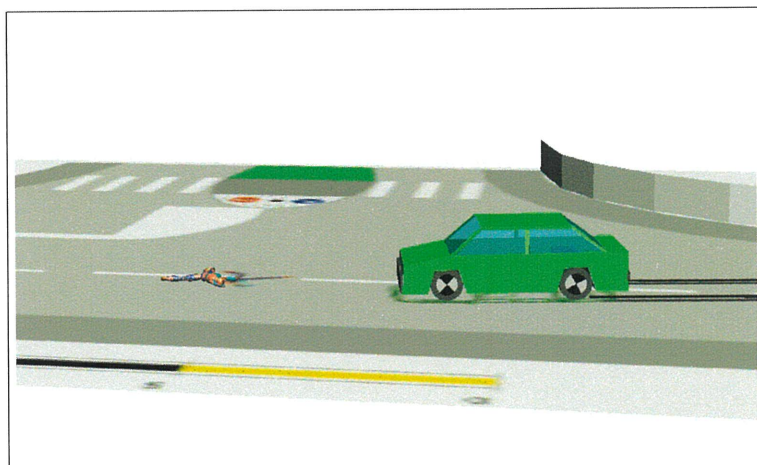


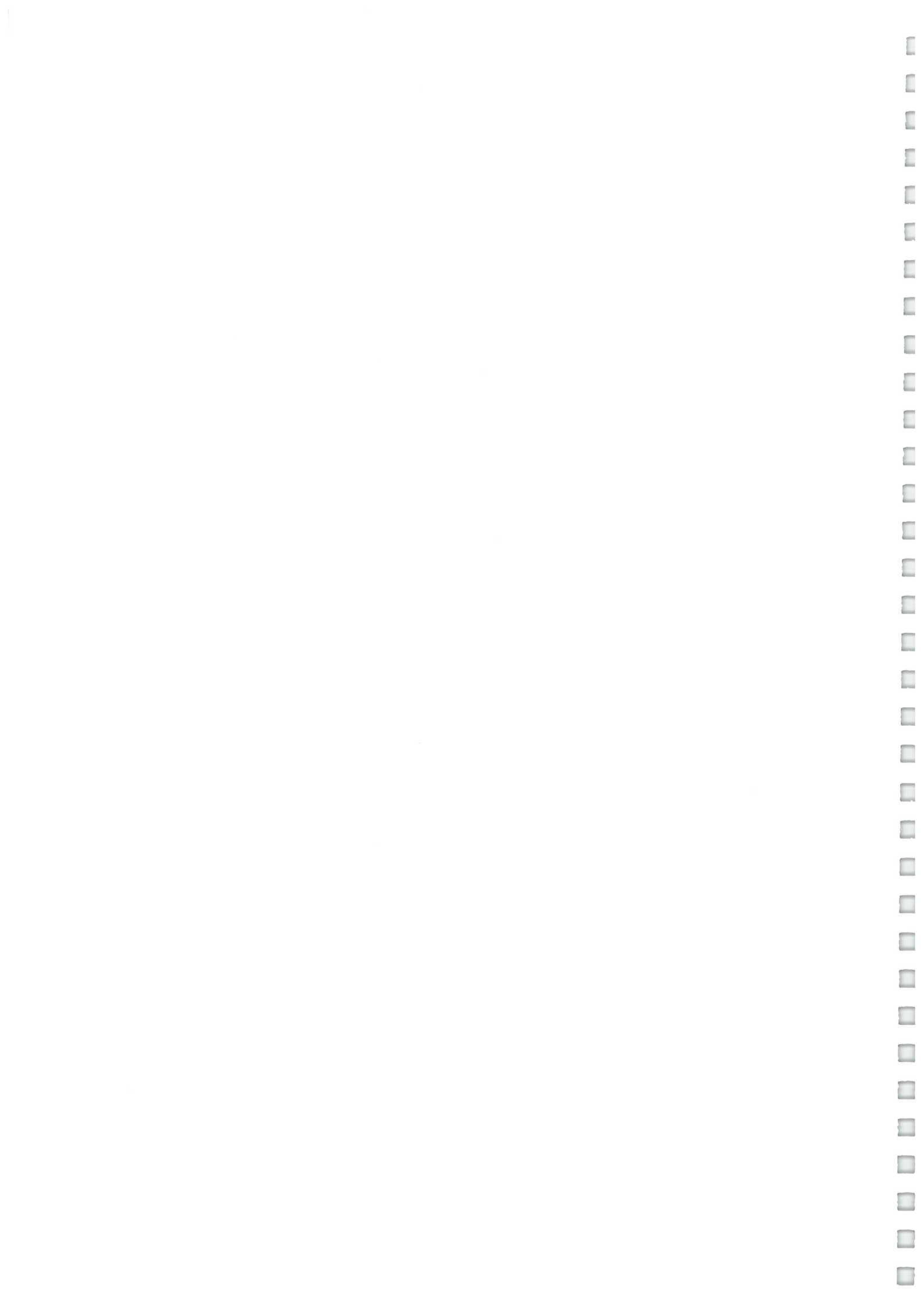
FIGURE 39 – Paramétrage géométrique du véhicule et visualisation en trois dimensions dans l'interface PC CRASH

- Les caractéristiques techniques et géométriques du véhicules (Longueur, largeur, empattement, masse, position du centre de gravité, *etc...*),
- Les caractéristiques anthropométriques du piéton (taille et poids),
- Les caractéristiques physiques des éléments multi-corps ( $\mu_p = 0.66$ ,  $\mu_{veh} = 0.20$ ,  $\mu_{sol} = 0.8$ ,  $k = 0.1$ ),
- Positionnement et vitesse du piéton ( $V_F = 5 \text{ km/h}$ ),
- Dynamique du véhicule (définition des séquences).



La simulation numérique est considérée comme juste lorsque toutes les contraintes précédemment sont prises en compte et lorsque les positions résiduelles du piéton et de la voiture sont respectées par rapport au plan.





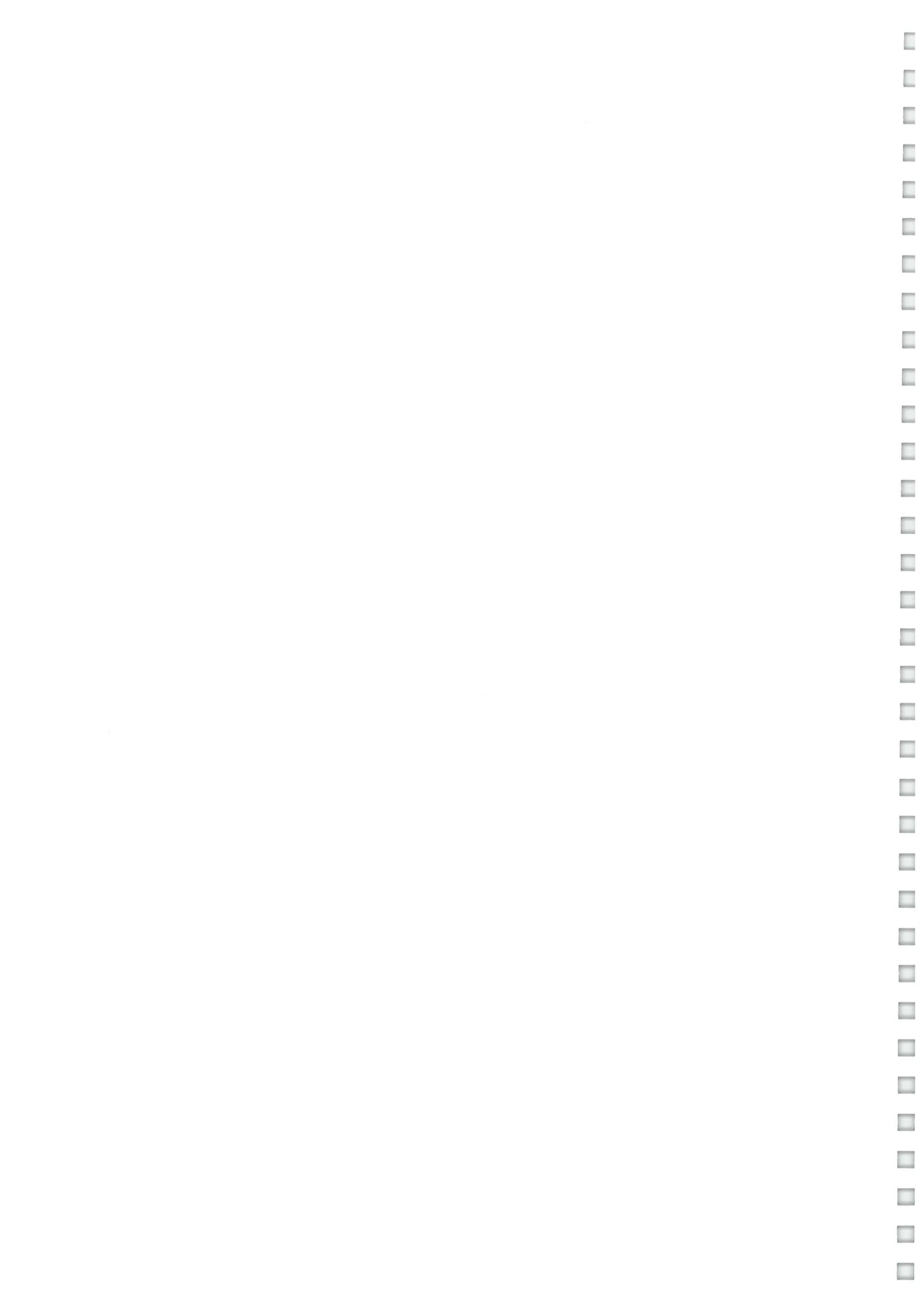


## 10.2 Synthèses

Modélisation par la conservation de la quantité de mouvement		
Modèle	INPUT	OUTPUT [km/h]
Qté de mouvement	$V_c', IF, m_{VL}, m_p$	$V_c = 42, 96, \Delta V = 1, 3$
Modélisations analytiques simples		
Modèle	INPUT	OUTPUT [km/h]
COLLINS	$D_p, \mu_p, H_2, PE$	$V_c = 41, 57, V_p = 39, 50$
SEARLE et SEARLE	$D_p, \mu_p, PE$	<b>min</b> : $V_c = 42.58, V_p = 40.45$ <b>max</b> : $V_c = 51.02, V_p = 48.47$
SEARLE	$D_p, \mu_p, H_2, PE$	<b>min</b> : $V_c = 43.48, V_p = 41.30$ <b>max</b> : $V_c = 52.09, V_p = 49.49$
SEARLE (avec pente)	$D_p, \mu_p, H_2, PE, \alpha$	<b>min</b> : $V_c = 43.01, V_p = 40.86$ <b>max</b> : $V_c = 51.53, V_p = 48.96$
RICH	Inapplicable (POL inconnu)	
Modélisations empiriques		
Modèle	INPUT	OUTPUT [km/h]
SCHTERBETCHEFF	$a_m, D_p$	$V_c = 47.41$
APPEL	$D_p$ (modèle adulte)	$V_c = 50.91$
STURZ	Inapplicable : véhicule en forme avant de type trapézoïdale	
WOOD	$D_p$	<b>min</b> : $V_c = 33.66$
		<b>moy</b> : $V_c = 48.45$
		<b>max</b> : $V_c = 60.59$
FUGGER	$D_p$	$V_c = 41.22$
TOOR 2002	$D_p$ [15 <sup>ème</sup> centile, 85 <sup>ème</sup> centile ]	$V_c = 45.91 \pm 9$
TOOR 2003	$D_p$ [15 <sup>ème</sup> centile, 85 <sup>ème</sup> centile ]	$V_c = 44.28 \pm 5.8$
SIMMS	$D_p, S_0, C, D, [\text{normal}]$	<b>min</b> : $V_c = 36.76$
		<b>max</b> : $V_c = 55.64$
Modélisations multicorps (VALIDATION SCIENTIFIQUE)		
Modèle	INPUT	OUTPUT [km/h]
PC CRASH vs 8.2	géométrie avant du véhicule, caract. anthropométrique du piéton position et vitesse du piéton $a_m, D_p, \mu_p, \mu_{veh}, \mu_{sol}, k$ POI, POR	$V_c = 44.00$

TABLE 8 – Tableau synthétique de la vitesse d'impact reconstruite (OUTPUT) du véhicule selon différentes méthodes et les différentes valeurs d'entrée données (INPUT) .

Le tableau 8 ci-dessus montre que le résultat final  $V_c=44$  km/h apporté par la simulation numérique issue de PC CRASH est une valeur se situant dans l'intervalle de valeur donnée par l'estimation utilisant la modélisation simple et empirique.

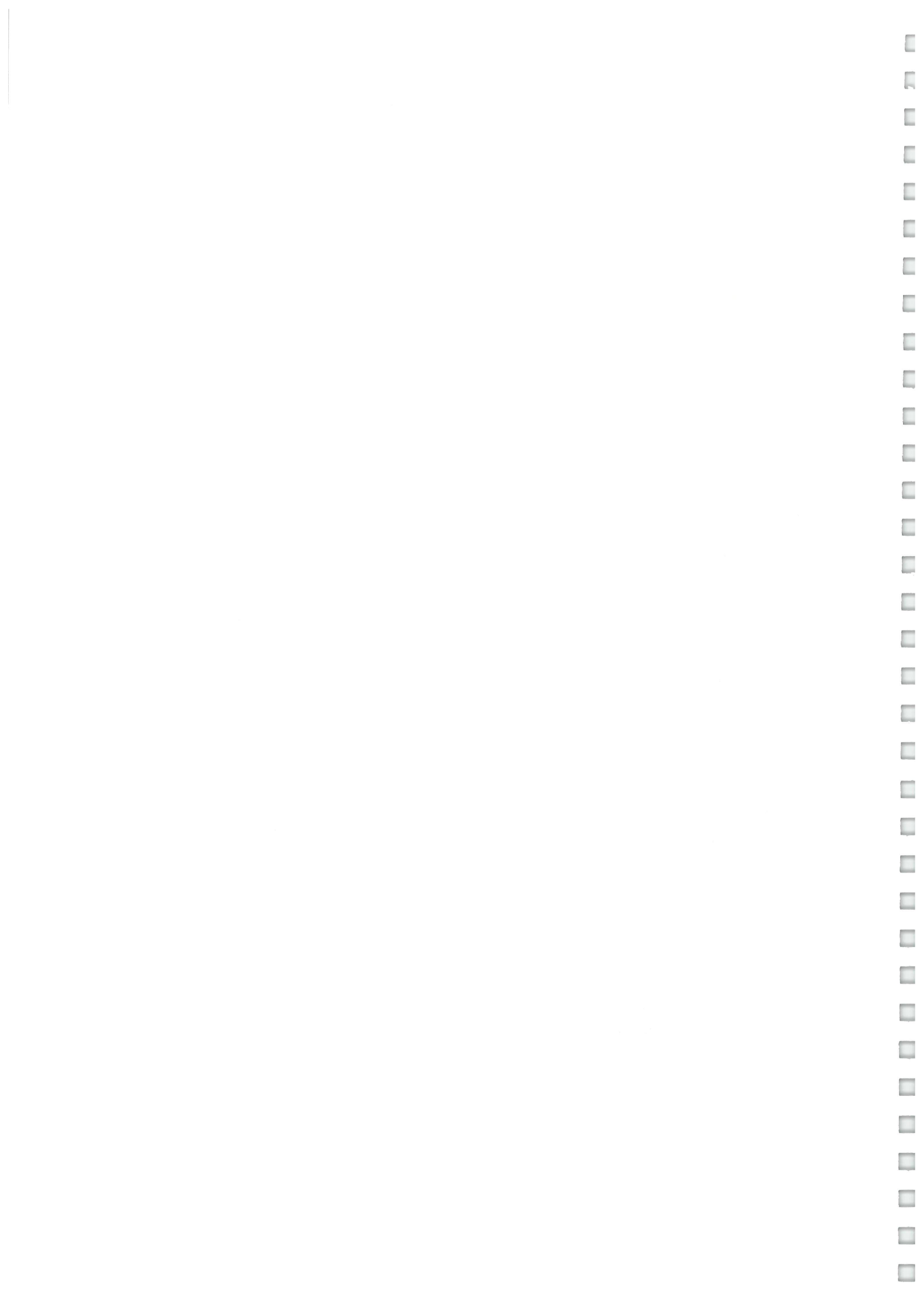


Nous avons dans un premier temps défini les conditions initiales nécessaires à la simulation en donnant un intervalle dans lequel se situe la vitesse d'impact du véhicule. Ensuite, en faisant plusieurs itérations successives pour obtenir les positions résiduelles justes du piéton et du véhicule compte tenu du plan, nous avons obtenu la vitesse d'impact sous forme de valeur fixe qui représente en conséquence la VALIDATION SCIENTIFIQUE du calcul.



# Bibliographie

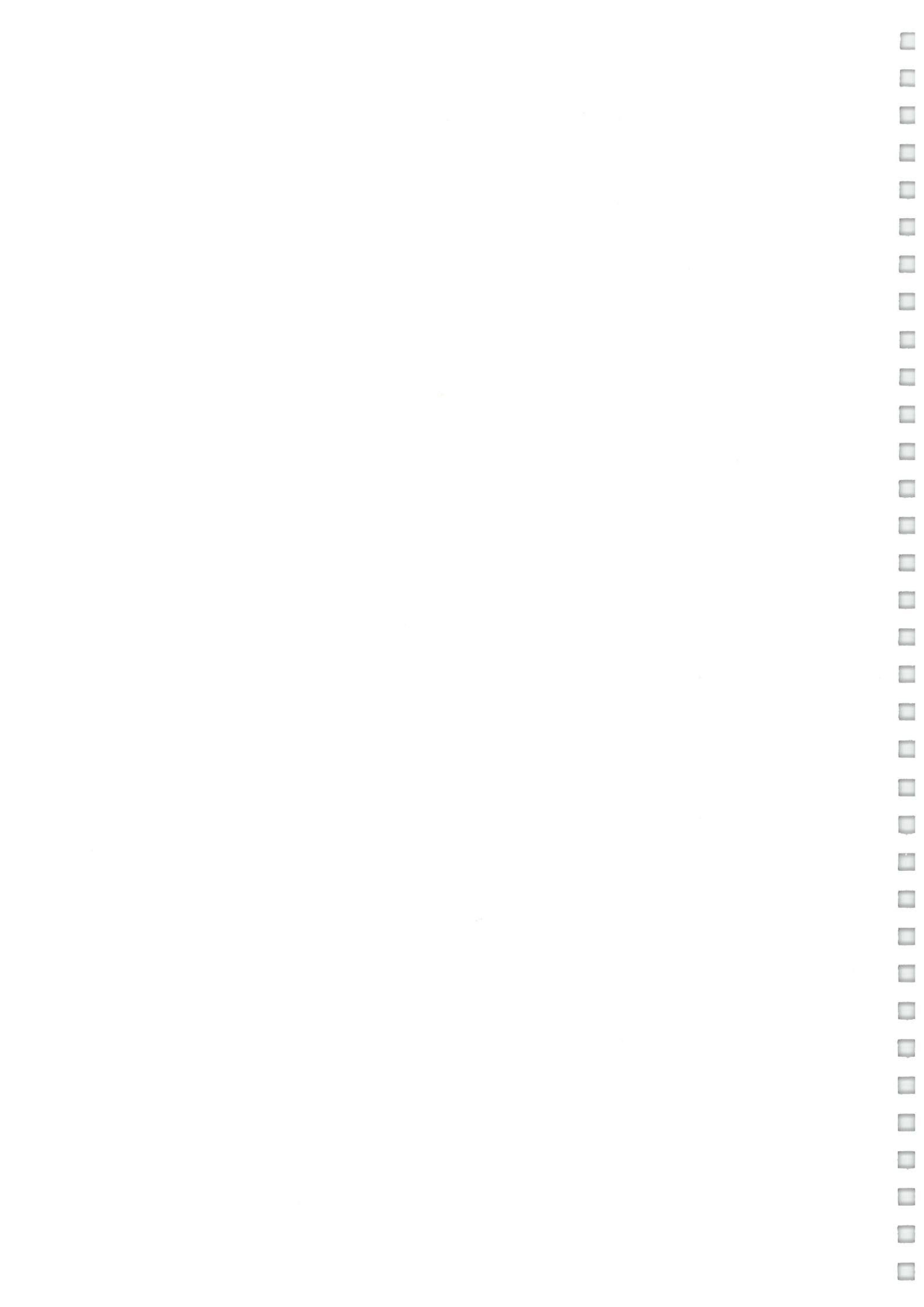
- [1] Appel H., Sturtz G., and Gotzen L. *Influence of impact speed and vehicle parameters on injuries of children and adults in pedestrian accidents* Proceedings 2<sup>nd</sup> International IRCOBI Conference, 1975, pp 83-100.
- [2] Becke M., Golder U. *Rutschweiten von Fussgaenger auf nasser Fahrbahn. Verkehrunfall und Fahrzeugtechnik*, pp 327 328, December 1988.
- [3] Braun, H. *Splitterwurfweiten (Throw distance of glass fragments)* VuF 18 (1980), 37-43
- [4] Collins J.C. and Morris J.L., *Accident reconstruction, Highway Collision Analysis* Thomas Publishing, 1979.
- [5] Danner M., Langwieder K. and Watcher W., *Injuries to pedestrians in real accidents and their relation to collision and car characteristics* SAE Paper No. 791008, 1979
- [6] Depriester J-P, Perrin C, Serre T, Chalandon Sophie *Comparison of several methods for real pedestrian accident*. Paper Number 05-0333, congrès ESV 2005 Washington. 6-9 Juin 2005.
- [7] Dettinger, J. *Beitrag zur Verfeinerung der Rekonstruktion von Fußgänger Unfällen. (A contribution to the refinement of pedestrian accident reconstruction)* VuF 34 (1996), 324-330 + 35 (1997), 25-30.
- [8] Durigon M. *Pratique médico-légal* ISBN 10 : 2294704428, ISBN 13 : 9782294704420 édité chez Masson, 2007.
- [9] Eberhardt W., Himbert G. *Bewegungsgeschwindigkeiten, Versuchsergebnisse nicht motorisierter Verkehrsteilnehmer (Moving speeds, experimental results for non-motorised traffic participants)* Autors / publishers Saarbrücken, 1977.
- [10] Eubanks J.J. *Pedestrian Accident Reconstruction* Lawyers and Judges Publishing Company. USA. 1994
- [11] Eubanks J. and Hill P., *Pedestrian Accident Reconstruction and Litigation* Lawyers and Judges Publishing Co, Inc., seconde édition , 1998
- [12] Fricke L.B. *Vehicule Pedestrian Accident Reconstruction* Northwestern University , Traffic Institute Topic 877 and Traffic Accident Reconsntruction Volume 2, 1990.
- [13] Fugger T.F. and Randles B.C. *Comparison of Pedestrian Accident Reconstruction models to experimental test data for wrap trajectories* C 567/031/2000 ImechE 2000
- [14] Happer A., Araszewski M., Toor A., Osvergaard R., and Ravinder J. *Comprehensive Analysis Method for Vehicule/Pedestrian collisions* SAE Paper No 2000-01-0846, 2000.
- [15] Hermann S. *PC-CRASH. A Simulation program for vehicle accidents* Dr. Steffan Dattentchnik, 1996. 202 p.





- [16] Kühnel A. *Vehicule Pedestrian Collision Experiments with the use of moving dummy* Proceeding of Eighteenth Conference of American Association of Automotive Medicine, 1974.
- [17] Kühnel A. *Der Fahrzeug -Fußgänger-Unfall und seine Rekonstruktion (The Vehicule Pedestrian accident and its reconstruction)* PhD Thesis, TU Berlin 1980.
- [18] Limpert R. *Motor Vehicle Accident Reconstruction and Analysis* Second Edition, The Michie Company.
- [19] Lucchini E., Weissner R. *Differences Between the Kinematics and Loading of Impacted Adults and Children. Results of Dummy Test* Proc. of the fifth International IRCOBI Conference on the Biomechanics of Impacts, Lyon, pp 167-179, 1980.
- [20] Moser A., Steffan H. and Kasanicky G. *The Pedestrian Model in PC-Crash - The Introduction of a Multibody system and its Validation* SAE Paper N°1999-01-0445, 1999.
- [21] Moser A., Steffan H., Hoschopf H. and Kasanicky G. *Validation of the PC-Crash pedestrian model* SAE Paper No. 2000-01-0847, 2000.
- [22] Moser A, Burg H. *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion. Unfallaufnahme, Fahrdynamik, Simulation* . ISBN : 3-8348-0172-0 (3834801720) 2007
- [23] Norme ISO 12353-1 :2002. *Analyse des accidents de la circulation, partie 1 : vocabulaire.* AFNOR . Mars 2002
- [24] Ravani B., Broughman D., and Hason R.T., *Pedestrian Post-Impact Kinematics and Injury Patterns* SAE Paper No. 811024, Proceedings of the Twenty-Fifth Stapp Car Crash Conference, 1981.
- [25] Rebiffé R., Guillien J., Pasquet P. *Enquête anthropométrique sur les conducteurs français* Laboratoire de physiologie et de biomécanique de l'association Peugeot-Renault. 1981-1982
- [26] Rich, A. S, *Estimating Vault Distance and Speed after Motorcycle or Bicycle Ejection* NJAAR, The Newsletter for Accident Reconstructionists, Vol. 3 No. 2, 1997
- [27] Rohm M. *Einfluss der Gehgeschwindigkeit auf die Querwurfeite und den Beulenversatz beim Fußgängerunfall* Influence of the pedestrian moving speed on the transversal throw and the damage offset. Diploma work, Universität de Hannover. 1994
- [28] Rohm M. *Der PKW-Fußgänger-Unfall*
- [29] Schneider H. and Beier G *Experiment and Accident : Comparison of Dummy Test Results and real Pedestrian Accidents* SAE Paper N°741177, 1974.
- [30] Shurz G., Sures E.G. *Kinematics of real pedestrian and two wheel rider accident* Proceeding of IRCOBI meeting on Biomechanics of injury to predestrians, cyclists and motorcycles, 1976.
- [31] Searle J. A. and Searle A. *The Trajectories of Pedestrians, Motorcycles, Motorcyclists, etc., Following a Road Accident* SAE Paper N° 831622, 1983.
- [32] Searle J A. *The Physics of Throw Distance in Accident Reconstruction.* SAE 930659, 1993.
- [33] Sens M.J., Wiechel J.F., Cheng P.H., Marandi M., and Guenther D.A. *The vocabulary of Accident Reconstruction* SAE paper N° 890634, International Congress and Exposition Detroit, Michigan February 27 - March 3, 1989





- [34] Severy D., Brink H. *Auto Pedestrian Collision Experiments* SAE paper N° 890859
- [35] Shin J., Lee S. H., Kerrigan J., Darvish K., Crandall J., Akiyama A., Takahashi Y., Okamoto M and Kikuchi Y. *Development and Validation of a Finite Element Model for the Polar-II Upper Body* SAE Paper No 2006-01-0684, 2006.
- [36] Simms C., Wood D. *Pedestrian and Cyclists Impact. A biomechanical Perspective Series : Solid Mechanics and Its Applications* , Vol. 166 2009, XVI, 232 p., Hardcover .ISBN : 978-90-481-2742-9
- [37] Simms C. K., Wood D.P. and Walsh D.G. *Confidence limits for impact speed estimation from pedestrian projection distance* International Journal of Crashworthiness, Vol. 9, No. 2. (1 March 2004), pp. 219-228.
- [38] Steffan H. *PC CRASH, A Simulation Program for Vehicle Accidents*. Technical manual , Octobre 2001.
- [39] Steffan H., *Unfallmechanik im Verkehrswesen* LV. Nr : 333.036 / 333.037
- [40] Stcherbatcheff G., Tarriere C., Duclos P., Fayon A., Got C, Patel A. *Simulation of collisions between pedestrians and vehicles using adult and child dummies* SAE paper N° 751167, 1975.
- [41] Stevenson T.J., *Simulation of vehicule-pedestrian* A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Engineering in the University of Canterbury. University of Canterbury, 2006
- [42] Sturz G., Suren E.G., Gotzen L., Behrens S., Richter K. *Biomechanics of real Child Pedestrian Accident* SAE paper N° 760814, 1976.
- [43] Subrata Das et Dhingra S.L *Accident Reconstruction of Pedestrian-Vehicle collision*
- [44] Toor A, Araszewski M., Johal R., Overgaard R., Happer A *Revision and validation of vehicle/pedestrian collision analysis method* SAE paper N° 2002-01-0550, 2002.
- [45] Toor A, Araszewski M. *Theoretical vs. empirical solutions for vehicle/pedestrian collisions* ASME Paper (2003-01-0883).
- [46] Windisch M. *Analysing the moving speed of 2 to 3 years old children - video analysis and statistical evaluation* EVU , 2007
- [47] Winter D.A. *Biomechanics of Human Mouvement* Med. Phys. Volume 8, Issue 4, pp. 528-528 (July 1981)
- [48] Wood D.P., Riordoin S.O. *Impact Speed from Bicycle, Motorcycle and Rider Throw Distance* Proceeding of the Canadian Multidisciplinary Road Safety Conference 6. University of New Brunswick, 1989.
- [49] Wood D.P., Simms C.K. *A Hybrid Model of Pedestrian Impact And Projection* Journal of crashworthiness 5(4), 257-269, 2000.
- [50] Wood D.P., Simms C.K. and Walsh D.G., *Vehicule-pedestrian collisions : validated models for pedestrian impact and projection* Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers Part D, 2005.

