

LBMC UMR_T 9406, Univ Eiffel-UCBL
Univ Eiffel – Campus de Lyon
25, avenue François Mitterrand
69675 BRON Cedex
<http://www.lbmc.ifsttar.fr/>

ÉVALUATION ET MODELISATION

DES DISPOSITIFS DE RETENUE POUR MOTARDS

Name of the contract: Convention IFSTTAR/DSR N°2102598852 du 11 décembre 2018

Versions	Date	Written by	Reviewed by	Approved by
V1	28/09/2021	Li PENG	Denis BRIZARD Clément GOUBEL	Michel MASSENZIO

Confidential: No

Description of the request

Title: Évaluation et modélisation des dispositifs de retenue pour motards

Sponsor: DSR – Délégation à la Sécurité Routière

Contact: Michel MASSENZIO

Objective:

Dans le contexte de l'évaluation et de la modélisation des dispositifs de retenue pour motard, la prise en compte des conditions d'impact (angle, vitesse...) et la variabilité des caractéristiques des constituant de ces dispositifs constituent des limites à l'évaluation par un nombre réduit d'essais expérimentaux à l'échelle 1. Cette étude présente une démarche associant essais expérimentaux, modélisation numérique et analyse de sensibilité afin de proposer une évaluation robuste des dispositifs.

Follow up of the request at Ifsttar:

Convention IFSTTAR/DSR N°2102598852 du 11 décembre 2018

Table of contents

1	Introduction et objectifs	5
1.1	Contexte	5
1.2	Positionnement par rapport aux travaux du laboratoire	5
1.3	Démarche	6
2	Conditions initiales d'impact du motard sur dispositifs de retenue routier - simulation numérique	7
2.1	Introduction	7
2.2	Analyse bibliographique, accidentologie, profils routiers	7
2.3	Modèle numérique de chute motard	8
2.4	Essais expérimentaux de chute motard	10
2.4.1	Dispositif d'essai	10
2.4.2	Configuration d'essai	11
2.4.3	Résultat et validation	11
2.5	Plan d'expérience – Analyse de sensibilité	13
2.5.1	Définition des conditions initiales d'impact	13
2.5.2	Plan d'expérience et démarche	14
2.5.3	Résultat	17
2.6	Discussion et conclusion	22
3	Influence des conditions initiales d'impact sur les performances du dispositif de retenue	23
3.1	Introduction	23
3.2	Modèle numérique d'impact motard	23
3.3	Analyse de sensibilité	27
3.4	Essais expérimentaux d'impact motard	30
3.4.1	Dispositifs d'essai	30
3.4.2	Configurations d'essai	31
3.4.3	Résultats	32
3.5	Conclusion	35
4	Conclusions & perspectives	36
5	Références	38
A.	Annexe : Rapport d'essais Inter laboratoires	40

B.	Annexe : Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour la validation du modèle de chute motard	45
C.	Annexe : Variation de critères de blessure pour l'influence de coefficient de frottement entre motard-barrière	46
D.	Annexe : Graphes des critères de blessure pour validation du modèle d'impact motard	47
E.	Annexe : Effets principaux des conditions d'impact en petites variations	48
F.	Annexe : Image de la cinématique pour la chute 40km/h et 60km/h	51

1 Introduction et objectifs

1.1 Contexte

Les dispositifs de retenue de motards installés sur nos routes font partie des infrastructures dont l'objectif est de réduire les conséquences d'un accident en termes de mortalité et de gravité de blessures. Ces dispositifs de protection pour motocyclistes sont principalement évalués par la procédure d'essai européenne CEN/TS 1317-8. La méthode consiste à projeter un mannequin à 60 km/h (ou 70 km/h) avec une incidence de 30° au droit d'un support et entre deux supports. Le mannequin est positionné sur le dos, la tête en avant. Les critères de blessure sont principalement focalisés sur la tête (HIC) et le cou. Au final, deux essais expérimentaux sont donc réalisés pour caractériser le dispositif de protection. Le coût de ces essais limite la procédure actuelle, car il est bien évident d'une part, que les conditions réelles sont d'une infinie diversité et que, d'autre part, le type de mannequin utilisé ne permet d'appréhender que les blessures les plus graves.

L'évaluation et la modélisation des dispositifs de retenue pour motard sont donc limités par ce nombre réduit d'essais expérimentaux à l'échelle 1 qui ne permettent pas de prendre en compte :

- Les conditions initiales d'impact du motard sur le dispositif (angle, vitesse, position du motard, masse...)
- La variabilité des caractéristiques des constituants du dispositif (variabilité de la limite d'élasticité des organes « programmés » pour se plastifier durant l'impact par exemple)

Cette étude présente une démarche associant essais expérimentaux, modélisation numérique et analyse de sensibilité afin de proposer une évaluation robuste des dispositifs.

In fine, la démarche proposée pourra être mise à profit :

- Par le législateur qui pourra proposer une évolution de la réglementation incluant essai expérimental et modélisations numériques en vue d'une meilleure évaluation des dispositifs de retenue. L'amélioration de l'évaluation repose sur une prise en compte de plusieurs scénarii d'accident d'une part et sur la définition de critères de blessure complémentaires à ceux autorisés par le mannequin réel.
- Par les fabricants qui disposeront d'un guide pour la conception et l'optimisation de leur dispositifs.
- Par les autorités publiques responsables des infrastructures routières, qui disposeront en amont d'un outil pour décider ou non de l'implantation d'un écran.

1.2 Positionnement par rapport aux travaux du laboratoire

La caractérisation et la modélisation des dispositifs de retenue de véhicules et/ou motard est un axe de recherche prioritaire de l'équipe de recherche impliquée dans ce projet. Initiée depuis une dizaine d'année, cette thématique a donné lieu à trois thèses. La thèse de Clément Goubel (2012) [1] s'est intéressée aux dispositifs mixte acier/bois de retenue de véhicule, avec une approche associant essais expérimentaux et modélisation numérique. Il y a été démontré que le classement des barrières -via les performances mesurées- est fortement dépendant des caractéristiques intrinsèques des matériaux la constituant : le bois dont les caractéristiques dépendent des conditions environnementales, mais pas seulement puisque l'acier présente aussi des variabilités fortes.

Or un nombre réduit d'essais expérimentaux ne permet pas d'appréhender cette variabilité. La thèse de Vidjannagni Kodjo (2016) [2], portant sur les écrans motards, a notamment complété ce constat en

montrant que l'évaluation du dispositif de retenue est de plus influencé par l'équipement du motard et que les conditions initiales d'impact sont bien plus diverses que celles qui peuvent être envisagées dans le cadre d'essais expérimentaux coûteux. Dans une troisième thèse, Gengjian Qian (2017)[3] s'est alors attaché à mettre en œuvre les outils d'analyse de sensibilité permettant une évaluation robuste des dispositifs de retenue de véhicule.

Dans la quatrième thèse sur le sujet, Li Peng (2021) a pour objectif de mettre en œuvre les outils d'analyse de sensibilité (Qian) dans le contexte des écrans motard (Kodjo). Les travaux doivent apporter des réponses aux verrous scientifiques suivants :

- Définition d'une base de données relatives aux conditions initiales d'impact du motard sur le dispositif de retenue,
- Développement et validation d'un modèle numérique d'impact motard sur dispositif de retenue,
- Outils d'analyse de sensibilité de la performance des dispositifs de retenue.

Le présent projet s'intègre dans le cadre de cette thèse.

1.3 Démarche

Les travaux sont menés au sein du LBMC avec les partenariats de DynaS+ pour les aspects numériques et de Transpolis pour les aspects expérimentaux.

Afin de constituer une base de données des conditions initiales d'impact du motard sur le dispositif de retenue, les études suivantes ont été réalisées :

- Analyse bibliographique – accidentologie,
- Modélisation numérique
 - o Développement d'un modèle numérique éléments finis de perte de contrôle du motard permettant de modéliser sa chute (dénommé *modèle chute motard* dans la suite du document) ;
 - o Validation du modèle numérique par des essais sur piste avec mannequin ;
 - o Constitution d'une base de données « chute motard » à partir d'un plan d'expérience sur les conditions de chute (vitesse, déclenchement de la perte de contrôle...) ;
 - o Base de données des typologies de virage ;
 - o Définition des conditions initiales d'impact à partir des deux bases de données ci-dessus.

Le modèle numérique d'impact motard sur dispositif de retenue correspond à la version virtualisée de l'essai EN1317, mais pour lequel les conditions initiales d'impact sont paramétrables (dénommé *modèle impact motard* dans la suite du document). Il est donc constitué d'un mannequin numérique équipé d'un casque homologué (+combinaison et bottes) et d'un dispositif de retenue choisi parmi les modèles les plus courants équipant déjà les routes. Ce modèle est validé par le moyen d'un essai expérimental sur piste.

Enfin, un plan d'expérience basé sur le modèle *impact motard* est réalisé à partir de la base de données *chute motard*. Une analyse de sensibilité des résultats numériques est finalement réalisée.

2 Conditions initiales d'impact du motard sur dispositifs de retenue routier - simulation numérique

2.1 Introduction

Cette première partie vise à étudier des conditions initiales d'impact du motard sur dispositifs de retenue routier. L'analyse bibliographique sur l'accidentologie sera introduite dans un premier temps ; puis une approche par simulation numérique sera présentée.

Un modèle numérique de chute motard est développé permettant de simuler la perte de contrôle du motard en virage. Le comportement dynamique du mannequin numérique (Hybrid III) sera validé par des essais sur piste.

Un plan d'expérience sur les conditions de chute est ensuite établi afin de constituer une base de données de chute motard. En associant la base de données de chute motard et des typologies des virages, on obtient la distribution des conditions initiales d'impact du motard (vitesse d'impact, angle d'impact, position du motard) sur le dispositif de retenue routier. La corrélation des conditions de chute avec les conditions initiales d'impact sera également étudiée.

2.2 Analyse bibliographique, accidentologie, profils routiers

Les conducteurs de deux-roues motorisés sont considérés comme les usagers de la route les plus vulnérables, représentant seulement 1.9% du trafic routier global mais 21,5% de la mortalité des usagers routiers en France. Le risque d'être tué pour un motocycliste est 21 fois plus important que des usagers de véhicules de tourisme à même distance parcourue [4].

Dans des accidents impliquant seulement des motocyclistes, la perte de contrôle dans un virage est la cause d'accidents la plus impliquée. Les causes principales de la perte de contrôle sont nombreuses, telles que la mauvaise manœuvre dans un virage, la surface de route détériorée imprévue ainsi que le changement brutal de la géométrie de la route. Le risque de perte de contrôle est par ailleurs plus important dans les virages à droite [5].

Les motocyclistes sont plus touchés dans les accidents par collision avec des obstacles fixes (dispositifs de retenue routier, arbres, poteau éclairage etc.) par rapport aux usagers de véhicule, particulièrement en virage. Selon des études, les motocyclistes subissent généralement des blessures sévères ou même mortels lorsqu'ils impactent contre dispositifs de retenue routier[6], [7].

Le dispositif de retenue routier des motocyclistes (écran motard), généralement en acier, est installé au-dessous de la glissière de véhicule afin de retenir des motocyclistes errants et de les empêcher de heurter des objets dangereux au bord de la route.

La sévérité d'impact du motard sur la barrière relève l'importance de la capacité de retenir les motocyclistes par l'écran motard. La procédure normative d'évaluation de performance d'écran motard est limitée dans deux configurations d'impact. Il est évident que seulement deux configurations d'essai ne permettent pas de prendre en compte la diversité des configurations d'accident.

En outre, peu de recherches ont porté leur attention sur les conditions d'impact sur barrière dans des accidents de perte de contrôle. Seule la base de données DERKA a analysé la vitesse d'impact contre des dispositifs de retenue sur 53 accidents de moto seule [6]. La vitesse enregistrée varie entre 50km/h et 100km/h avec des prédominances de distribution à vitesse plus de 90km/h due aux critères de sélection des accidents sévères. Des informations concernant l'angle d'impact figurent dans l'étude GIDAS 2002[6] en disant que 72% des accidents d'impact sur barrière impliquent de petits angles (inférieur à 15°) même si cela est constaté pour seulement 18 cas étudiés.

Concernant les types de motocycles, les roadsters sont actuellement les motos de cylindrée plus de 125 cm^3 les plus vendues en France, suivi par les trails (10.9%), ensuite les sportives (5%). D'autre part, le projet RIDER sur des accidents de 2RM [8] montre que les motos sportives sont les plus souvent impliquées (25%) dans des accidents. L'architecture moto et les positions de conduite sur les roadsters et les sportives étant proches, c'est le type de motocycle sportif qui a été choisi pour faire la modélisation et pour simuler la perte de contrôle.

La première partie de notre étude cible la base de données des conditions d'impact en virage. Afin de déterminer les conditions initiales d'impact, la démarche consiste en premier lieu à déterminer les trajectoires du motard suite à une perte de contrôle dans une manœuvre de virage (sans dispositif de retenue) puis à déterminer les points d'impact possibles avec différents dispositifs de retenue. Il est donc nécessaire de disposer d'une base de données relative aux différents profils de virage présents sur les routes. Les informations sont issues de deux sources :

- « Vitesses pratiquées et géométrie de la route »[9], qui effectue des mesures de vitesse pratiquée en virage sur 230 sites en France; 90% des virages sont avec des rayons de courbure inférieurs à 500m.
- « Pertes de contrôle en courbe »[10], qui analyse 84 cas des accidents de perte de contrôle en virage. Le rayon de courbure peut arriver jusqu'à 650m mais la plupart des accidents ont lieu dans les virages de rayon inférieur à 500m.

2.3 Modèle numérique de chute motard

Le modèle numérique de chute motard est construit dans LS-DYNA et il se compose de trois éléments principaux : un modèle EF du motocycle, un mannequin Hybrid III utilisé comme motard et un mur rigide modélisant le sol.

La simulation a pour objectif de modéliser le comportement cinématique du motard après une perte de contrôle en virage. Dans la simulation, le comportement dynamique de la moto n'a d'intérêt que pour les premiers instants de la perte de contrôle, où elle interagit avec le motard. Son comportement après la séparation avec le motard n'est pas étudié. Pour cette raison, un modèle simplifié de la moto est suffisant. Ses composants principaux sont modélisés en rigide (pour des raisons de coût de calcul) à l'exception des pneus. Des caractéristiques physiques du motocycle sont appliquées selon [11]–[14]. Le modèle numérique du motocycle et le schéma cinématique associé sont dans les Figure 1 et Figure 2.

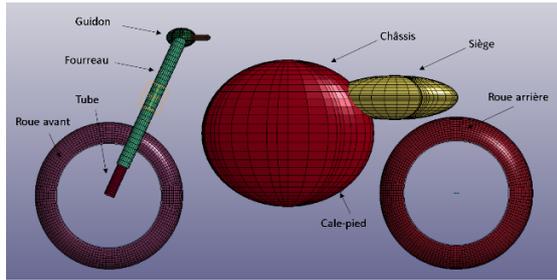


Figure 1 Modèle numérique du motocycle

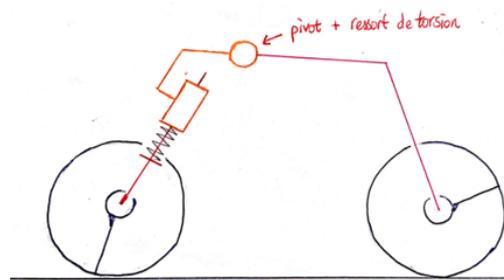


Figure 2 Schéma cinématique du motocycle

Comme le modèle de chute motard est composé du motocycle et du motard, la validation du modèle de chute motard se divise donc en deux validations indépendantes :

- Validation du modèle du motocycle seul ;
- Validation du modèle de chute avec mannequin.

Validation du modèle du motocycle seul :

La validation du modèle numérique du motocycle seul se repose sur la reproduction d'un impact frontal d'échelle 1, à 32.2km/h sur un mur rigide issu de la littérature [15]. Elle consiste à, d'une part faire la comparaison sur la cinématique et d'autre part comparer quantitativement la variation de l'accélération au centre de gravité (CG) du motocycle et la force de contact [14]. Les comparaisons des résultats expérimentaux et numériques sont présentées en Annexe B. L'évolution de CG de la moto et la force d'impact sont globalement cohérents entre la simulation et l'expérience.

Validation du modèle de chute motard avec mannequin :

Pour la validation, le modèle de chute a été soumis à la configuration d'essai crash de véhicule 413-0/13.4 [15], [16]. Le motocycle et le motard se déplacent à une vitesse de 13.4m/s et impactent latéralement un véhicule immobile (voir la Figure 3). La validation est faite par comparaison de la cinématique tous les 20ms avec le résultat expérimental (voir Annexe B). Une bonne corrélation a été retrouvée pour les premiers 140ms en termes de cinématique du motard et de la moto.

Le comportement principal du motard est bien reproduit et donc le modèle de chute motard est considéré validé.

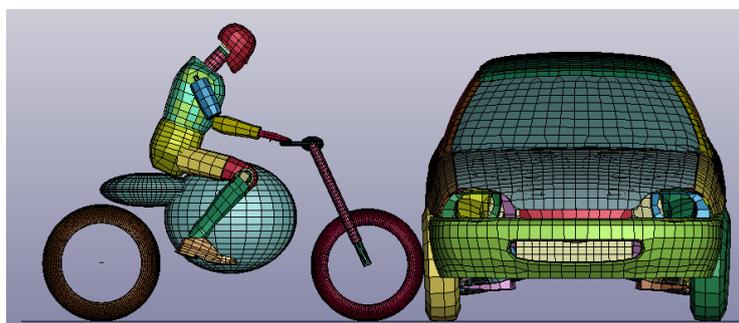


Figure 3 Essai crash de véhicule 413-0/13.4

Limites du modèle :

Dans la simulation de chute, l'hypothèse fondamentale, qui en constitue la limite principale, est que le mannequin est passif et donc la réaction du motard n'est pas prise en compte dans la simulation.

C'est une hypothèse forte, mais il est bien évident que la simulation de la réaction humaine reste encore un problème très complexe, multidisciplinaires qui sort du cadre de notre étude.

Le type de moto retenu pour notre étude constitue également une limite à la diversité des conditions de chutes que l'on peut obtenir : l'architecture du cycle, ses dimensions, la position du motard sur la moto notamment sont autant de conditions initiales de perte de contrôle qui influencent la trajectoire de chute qui s'en suit. Il en est de même pour les caractéristiques morphologiques du motard (mannequin Hybrid III).

Ces trois limites de notre étude sont en partie compensées par les très nombreuses conditions de perte de contrôle réalisées pour un type de motocycle et un motard passif.

2.4 Essais expérimentaux de chute motard

Afin de valider le modèle numérique de comportement dynamique du motard durant sa chute, les essais sont réalisés sur les pistes de Transpolis. La validation consiste à reconduire avec les situations de chute et à comparer les résultats expérimentaux et numériques. Les essais de chute sont réalisés sans moto. La position du motard au moment où son interaction avec la moto cesse est réalisée par le biais d'un support spécifique. Deux essais de chute motard ont été réalisés au sein du laboratoire Transpolis.

2.4.1 Dispositif d'essai

Les dispositifs mis en place pour l'essai chute motard sont :

- Un chariot de catapulte, qui permet de supporter le mannequin et de le projeter à la vitesse définie ;
- Un mannequin Hybride III habillé et casqué, équipé des accéléromètres au niveau de la tête et au centre de gravité du mannequin ainsi que des capteurs au cou ;
- Un support de mannequin, qui permet de le maintenir à 30° avec l'horizontal ;
- Un drone et des caméras rapides, qui permettent d'enregistrer la chute du motard sous différents angles de vue.



Figure 4 Configuration d'essai chute motard avec ses dispositifs

2.4.2 Configuration d'essai

Le mannequin casqué est positionné sur le support incliné à 30° dans la configuration correspondant au moment où son interaction avec la moto cesse (Figure 4). La position du corps et des membres sont issues du modèle numérique. Le seul écart vis-à-vis de la simulation est le contact des deux jambes dans le cas de l'essai : un système permettant de maintenir les deux jambes avec le bon écartement risquerait d'interagir avec le mannequin au moment du lâcher, cette solution a été préférée.

Deux essais de chute sont réalisés respectivement à vitesse réelle enregistrée 42.5km/h et 62km/h (dénommé 40km/h et 60km/h pour la suite, correspondant aux vitesses nominales). Cette configuration d'essai correspond au cas de perte de contrôle dans la simulation avec angle d'inclinaison 30° avec la verticale.

Le chariot de la catapulte est accéléré jusqu'à la vitesse souhaitée et stoppé par le système de freinage. Le mannequin quitte le chariot sous l'effet inertiel.

2.4.3 Résultat et validation

La chute du motard est enregistrée en vue de dessus sous forme de vidéo par drone et par des caméras fixes au sol. Les paramètres tels que trajectoire, vitesse et déplacement du motard sont obtenus par l'analyse de vidéo sous logiciel Kinovea. Les résultats d'essai seront comparés avec les résultats de simulation.

Le coefficient de frottement motard-sol reste un paramètre inconnu et mal maîtrisé. Il joue cependant un rôle important sur le résultat, c'est pourquoi une étude paramétrique est réalisée. Le résultat de l'étude paramétrique indique que l'influence de frottement est assez importante, particulièrement sur la vitesse et le déplacement. Plus le coefficient de frottement est faible, plus le motard peut glisser loin. Il convient de trouver une valeur de coefficient de frottement approprié, qui sera également employé dans la simulation suivante « impact barrière ».

Le résultat de l'étude paramétrique montre que pour la chute de motard à 40km/h et à 60km/h, la simulation corrèle mieux avec un coefficient de frottement de 0.75 ; valeur cohérente avec les données utilisées pour ce type de simulation.

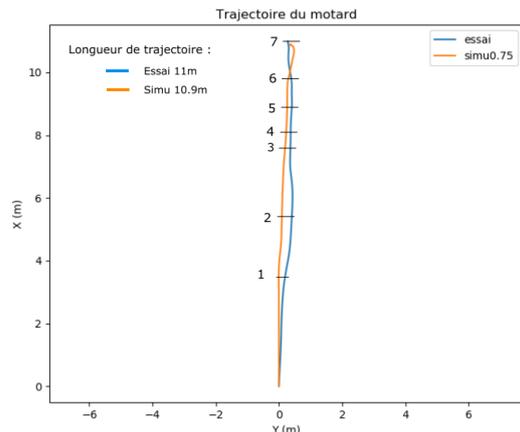


Figure 5 Trajectoire du motard pour la chute 40km/h

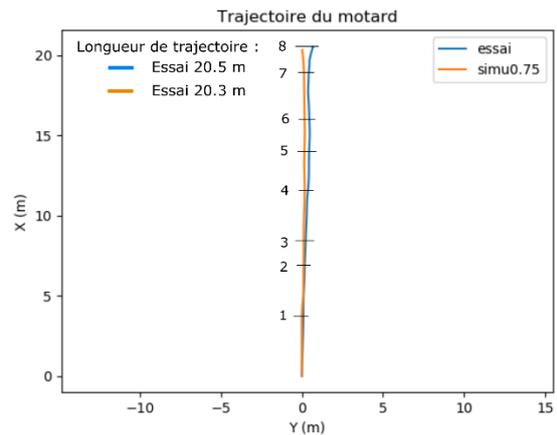


Figure 6 Trajectoire du motard pour la chute 60km/h

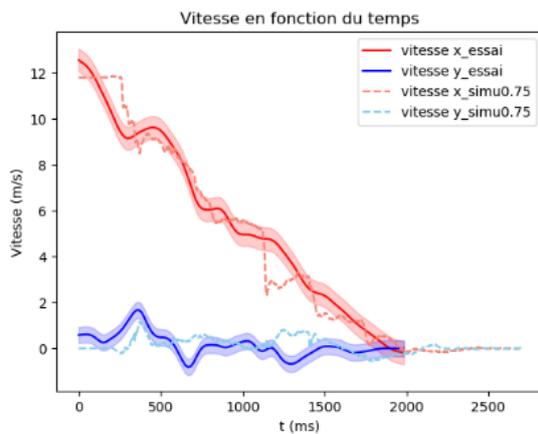


Figure 7 Évolution de la vitesse du centre de gravité du motard pour la chute 40km/h

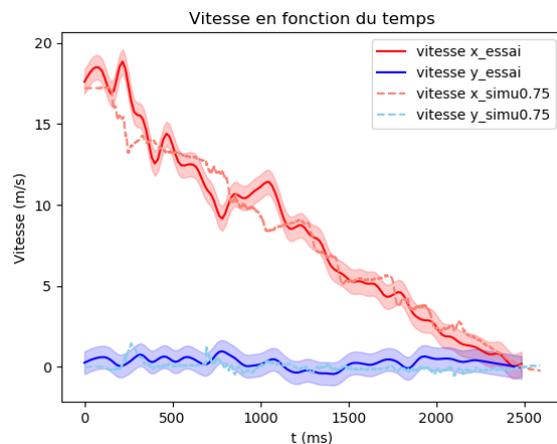


Figure 8 Évolution de la vitesse du centre de gravité du motard pour la chute 60km/h

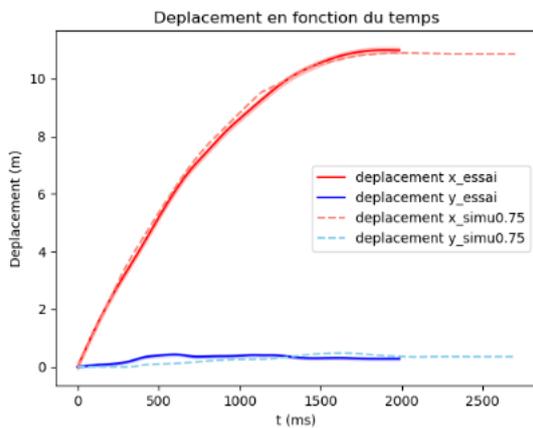


Figure 9 Évolution de la position du centre de gravité du motard pour la chute 40km/h

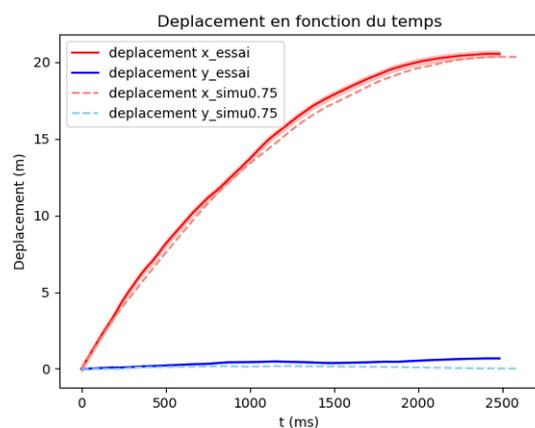


Figure 10 Évolution de la position du centre de gravité du motard pour la chute 60km/h

Les Figures 5 à 10 montrent les résultats expérimentaux et numériques pour la chute de motard à 40km/h et 60km/h. La précision a été estimée en répétant plusieurs fois le post-traitement des mesures et donc 0.5m/s et 0.35m/s de précision sont trouvés respectivement pour la vitesse sur x et y pour la chute à 40km/h. Pareil pour la chute à 60km/h, 0.75m/s et 0.7m/s ont trouvées respectivement pour la vitesse en x et y.

Concernant la cinématique du motard dans les essais, les images de cinématique de l'essai/simulation sont représentés le long de la trajectoire avec des instants numérotés (Annexe F). Les roulements sont constatés dans les deux essais. Le motard a roulé deux tours dans la chute à 60km/h alors qu'un seul dans la simulation. Pour la chute à 40km/h, le motard a roulé seulement un tour dans l'essai et la simulation.

La comparaison des trajectoires et des déplacements (suivant x & y) issus de la simulation et des essais montrent une bonne corrélation.

Quant à la vitesse, la variation est globalement cohérente. La présence du support dans l'essai et des incertitudes lors de l'analyse du vidéo permettent d'expliquer la différence de la vitesse entre la simulation et l'essai au début de la chute. Les points de changement de vitesse correspondent aux moments où le motard change sa position par rapport au sol.

Discussion sur le coefficient de frottement :

Le coefficient de frottement est trouvé cohérent, égal à 0.75 pour la chute de motard à 40km/h et 60km/h. Cependant, selon l'étude paramétrique établi, le coefficient de frottement motard-sol a des influences considérables sur la trajectoire du motard. Un écart de coefficient de frottement de 0.05 peut entraîner plus d'un mètre de différence sur la longueur de trajectoire.

Pour conclure, le modèle numérique du mannequin est validé dans le cas de chute. Concernant le coefficient de frottement, la valeur de 0.75 est adoptée, qui est cohérent avec l'article [17].

2.5 Plan d'expérience – Analyse de sensibilité

Cette partie introduira l'application du modèle numérique de chute motard dans la perte de contrôle en virage. Dans un premier temps, en tant que des outputs du plan d'expérience, des conditions initiales d'impact sont préalablement définies. Ensuite un plan d'expérience et la démarche permettent d'expliquer le processus d'obtention de la distribution des conditions initiales d'impact. Enfin, l'interprétation des résultats de distribution des conditions d'impact et une analyse de corrélation ont été menées.

2.5.1 Définition des conditions initiales d'impact

Avant d'introduire les variables d'impact, on définit comme référence le vecteur tangent de la barrière (comme \vec{u} dans la Figure 11) qui est dirigé dans le sens de déplacement du motard. Le vecteur du corps du motard (\vec{b}) est défini du bassin vers la tête.

Trois paramètres ci-dessous sont définis comme conditions d'impact :

- Vitesse d'impact \vec{v} : vitesse du motard au moment de la collision, la vitesse normative est de 60km/h ou 70km/h
- Angle d'impact $\alpha = (\vec{u}, \vec{v})$: angle aigu entre le vecteur tangent de la barrière et le vecteur de vitesse (Figure 11), l'angle d'impact normative est de 30° ;
- Angle de position du motard $\theta = (\vec{u}, \vec{b})$: position du motard est traduit par l'angle allant du vecteur de tangent \vec{u} au vecteur du corps du motard \vec{b} (Figure 12 et Figure 13).

Avec la définition de l'angle de position du motard ci-dessus, la configuration normative peut être distinguée en deux situations différents qui dépendent du sens de virage. Pour le virage à droite,

l'angle de position normative est de 30° et la plage de [0°, 180°] représente des configurations d'impact tête, alors que pour le virage à gauche, l'angle de position normatif devient 330° et impact tête est représenté par la plage de [180°,360°].

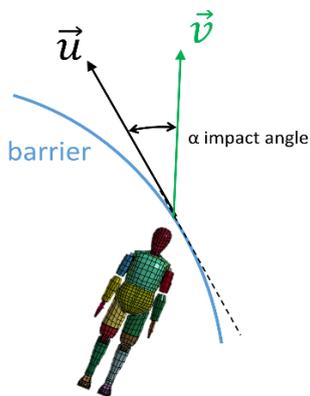


Figure 11 Angle d'impact

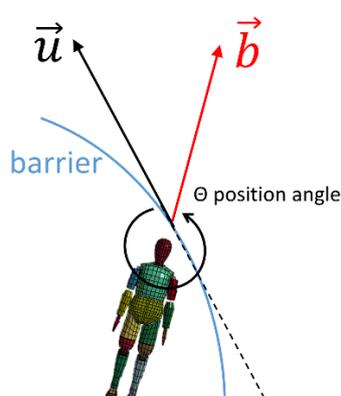


Figure 12 Angle de position du motard en virage à gauche

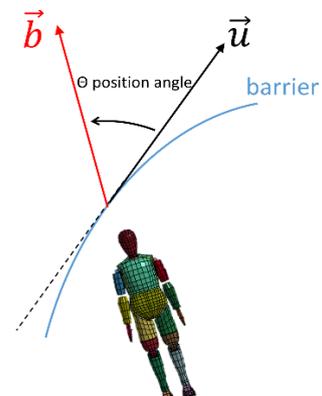


Figure 13 Angle de position du motard en virage à droite

2.5.2 Plan d'expérience et démarche

Plan d'expérience :

Le plan d'expérience contient deux catégories des paramètres d'entrée (Tableau 1) :

- Paramètres d'entrée de la simulation de chute dans LS-DYNA : vitesse de déplacement, angle d'inclinaison du motard au moment du déclenchement de perte de contrôle, coefficient de frottement du pneu arrière/sol. On dénomme aussi paramètres d'entrée de chute ;
- Paramètres d'entrée dans le post-traitement : rayon du virage impacté, largeur de la chaussée, direction du virage, et position du motocycliste sur la route (cela correspond à chaque largeur de chaussée, de gauche à droite en partant de la ligne médiane comme illustré dans la Figure 14). On dénomme aussi paramètres d'entrée de virage ;

Et des paramètres de sortie du plan global, il s'agit donc des trois conditions initiales d'impact, qui sont déjà définies dans le paragraphe précédent.

Paramètres d'entrée dans la simulation LS-DYNA	Unité	Valeurs
Vitesse de déplacement	km/h	40, 50, 60, 70, 80, 90
Angle d'inclinaison	°	20, 30, 40, 50
Coefficient de frottement pneu arrière/sol	-	0.05, 0.15, 0.25
Paramètres d'entrée pour le post-traitement	Unité	Valeurs
Rayon du virage impacté	m	50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500
Largeur de la chaussée	m	6, 7, 8, 9, 10
Direction du virage	-	Gauche, Droite
Position du motocycliste sur la route	-	50%, 62.5%, 75%, 87.5%, 95%

Tableau 1 Plan d'expérience de la simulation de chute

La Figure 14 illustre une situation de chute due à une perte de contrôle ainsi que la trajectoire dans le virage à droite, ce qui permet de mieux comprendre le plan d'expérience de la chute appliqué.

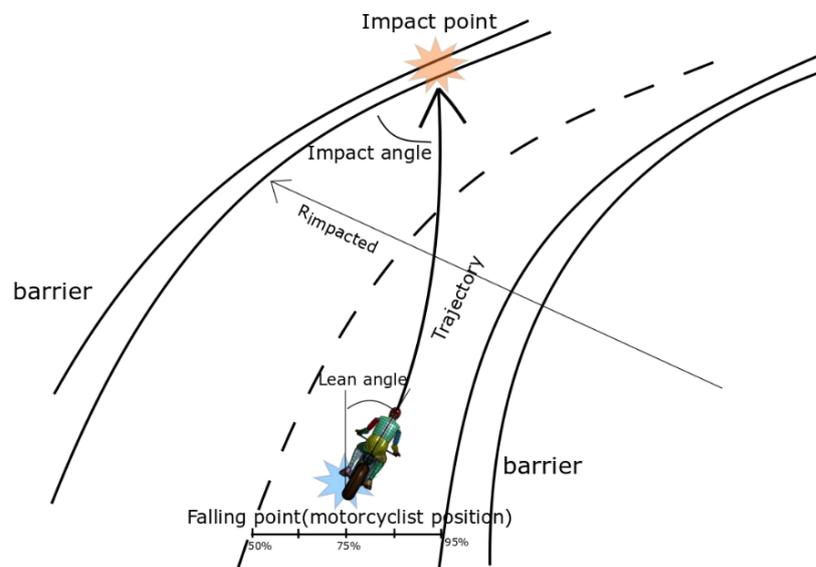


Figure 14 Configuration routière lors de la chute motard

La simulation est basée sur des paramètres d'entrée de chute. Au total 72 simulations de chute sont réalisées pour le virage à droite. Comme seul la moto et le motard sont intégrés dans le modèle de chute, les résultats pour les virages sont obtenus par symétrie.

Démarche :

La Figure 15 décrit la démarche pour obtenir la distribution des conditions d'impact. En appliquant le plan d'expérience au modèle numérique de chute motard, on va avoir au total 72 simulations qui correspondent à 72 trajectoires du motard différentes. La trajectoire du motard est représentée par la ligne violette pointillée dans la Figure 16 : 3 positions du motard sur la largeur de la voie. Le post-traitement des trajectoires est effectué avec le langage Python et dans lequel des paramètres d'entrée concernant la typologie des virages sont définis. En combinant des trajectoires (lignes violettes pointillées) et les différents rayons de courbure (lignes pleines dans la Figure 16), des points d'intersection (point en rouge) sont facilement déterminés et ce qui correspondent donc aux points d'impact sur barrière. Enfin des conditions initiales d'impact seront déduites pour ces points d'impact.

Le but du post-traitement est d'avoir plus des points d'impact et donc plus des conditions d'impact à partir d'une seule trajectoire du motard. L'intérêt de cette méthodologie est que nous pouvons obtenir de diverses conditions d'impact en associant la variation de la géométrie du virage et la position du motard sur la route en effectuant une seule simulation de chute motard. Cela nous permet de constituer une base de données riche sur des conditions d'impact en réduisant le coût de calcul.

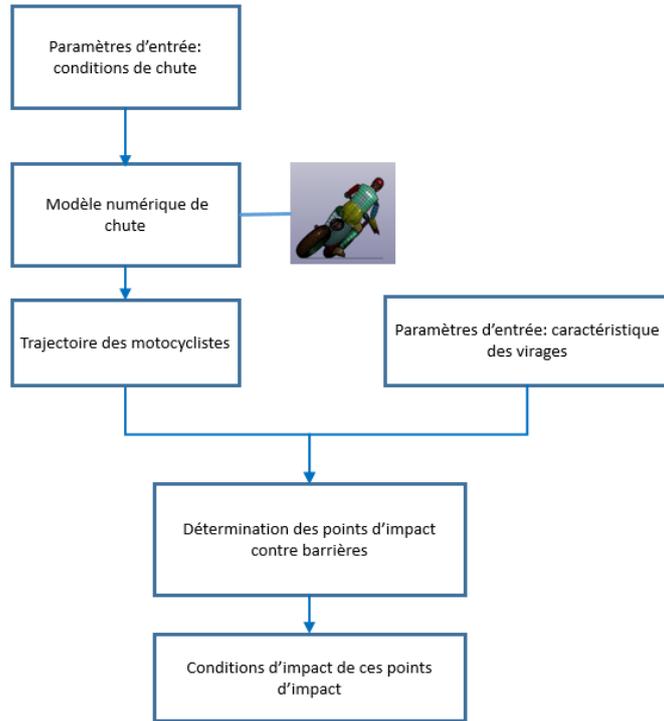


Figure 15 Diagramme de processus d'obtention de la distribution statistique des conditions d'impact

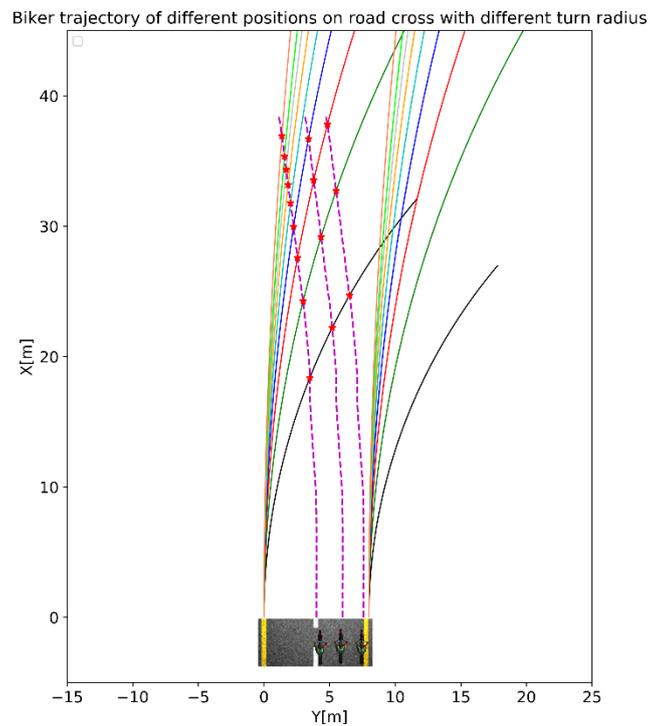


Figure 16 Exemple d'une trajectoire à trois positions différentes sur la route en croissant avec de différents rayons de courbure pour une largeur de chaussée donnée

2.5.3 Résultat

Un total de 72 simulations a été réalisé pour déterminer les trajectoires de chute. 50 virages ont été testés pour chaque sens du virage. Un nombre de 5076 points d'impacts pour le virage à droite et 10178 pour le virage à gauche sont recueillis. Le résultat sera présenté en deux parties : distribution des conditions d'impact et analyse de corrélation entre des conditions de chute et typologie de virage avec conditions initiales d'impact.

Distribution des conditions d'impact :

Rappelons que les conditions d'impact sont constituées de vitesse d'impact, angle d'impact et angle de position du motard. Bien que le k-s test (Kolmogorov–Smirnov test) montre que la distribution des conditions d'impact ne suit pas la distribution normale, on trace quand même les distributions normales qui correspondent à leur moyenne et écart-type afin de montrer la différence de distribution

Vitesse d'impact : La Figure 17 montre la distribution de vitesse d'impact en virage à droite(bleu) et à gauche(vert). Les vitesses normatives 60km/h et 70km/h sont représentées par deux lignes verticales en rouge. On voit que le motard a une vitesse d'impact moyenne plus élevée en virage à gauche qu'à droite, 52km/h contre 44km/h.

De plus, en virage à gauche, il contribue plus à grande vitesse, au-delà de 60km/h. Du point de vue de la vitesse d'impact, la survenue de perte de contrôle semble plus dangereuse dans le virage à gauche étant donné que la barrière est plus près avec une distance de décélération plus courte. Certes, la plage de vitesse d'impact obtenue dépend considérablement du choix de la vitesse de déplacement dans notre étude, qui est différente des petites routes à l'autoroute. Dans notre cas d'étude, on se focalise sur la chaussée de 2 voies, et donc la vitesse réglementaire est fixée maximum à 90km/h selon [9].

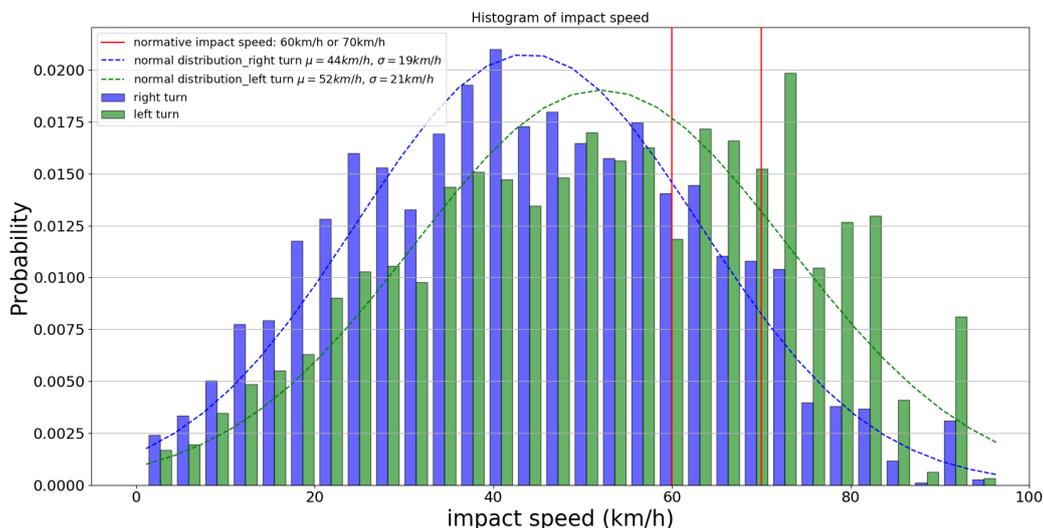


Figure 17 Distribution de la vitesse d'impact

Angle d'impact : Selon la Figure 18, on voit que la majorité des accidents par perte de contrôle surviennent avec un angle d'impact plus faible que l'angle normatif de 30°. Ceci est cohérent avec l'étude de GIDAS en indiquant que 72% des accidents moto contre barrière se produisent dans un angle d'impact inférieur à 15°, même si seulement 18 cas ont été analysés.

Les probabilités maximales sont trouvées à 7° pour le virage à gauche et 12° pour le virage à droite. Une plus grande plage de l'angle d'impact est observée pour les virages à droite, même en dehors de la norme. De ce point de vue, les virages à droite ayant des angles d'impact relativement plus importants semblent être plus dangereux car l'influence de l'angle d'impact a été évaluée que plus l'angle d'impact est grand, plus il augmente la gravité des accidents [18]–[20]. Par conséquent, la configuration normative est censée être, dans cette considération, beaucoup plus sévère.

Deux études [6], [21] se déclarent l'inquiétude de petits angles d'impact en causant le premier impact sur l'épaule et le bras. La charge latérale entre l'épaule et la barrière est un élément qui entraîne la possibilité du risque de blessures thoraciques graves, alors que les critères de blessure thoracique ne sont pas pris dans la norme.

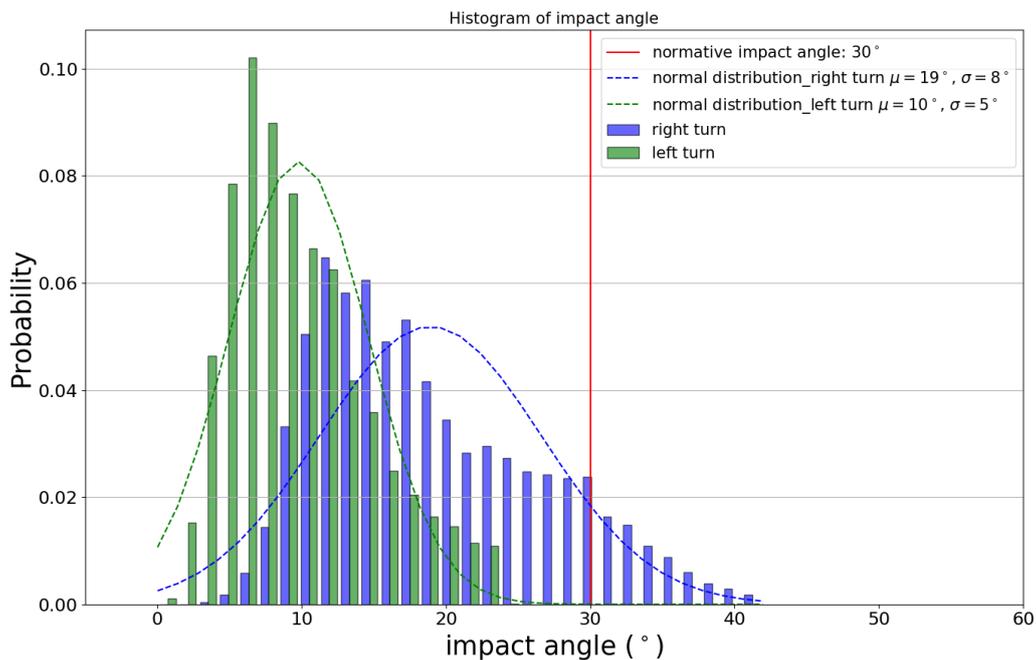


Figure 18 Distribution de l'angle d'impact

Angle de position : Comme décrit précédemment, la définition de l'angle de position se diffère en fonction du sens de virage. L'angle de position du motard pour la configuration normative est de 30° pour le virage à droite, et 330° pour le virage à gauche et ils sont représentés dans la Figure 19, respectivement par des lignes verticales bleu et vert. On remarque dans la Figure 19 une différence majeure de distribution de l'angle de position entre le virage à droite et à gauche. La distribution en virage à droite se disperse dans le domaine, ce qui signifie une probabilité équivalente de l'impact tête et l'impact pied. En revanche, pour le virage à gauche, la probabilité est trouvée importante entre 100° et 170°, ce qui implique la fréquence élevée de l'impact pied dans tel sens du virage. Le maximum de probabilité se trouve à environ 130°, décrivant un impact pied comme dans la Figure 20

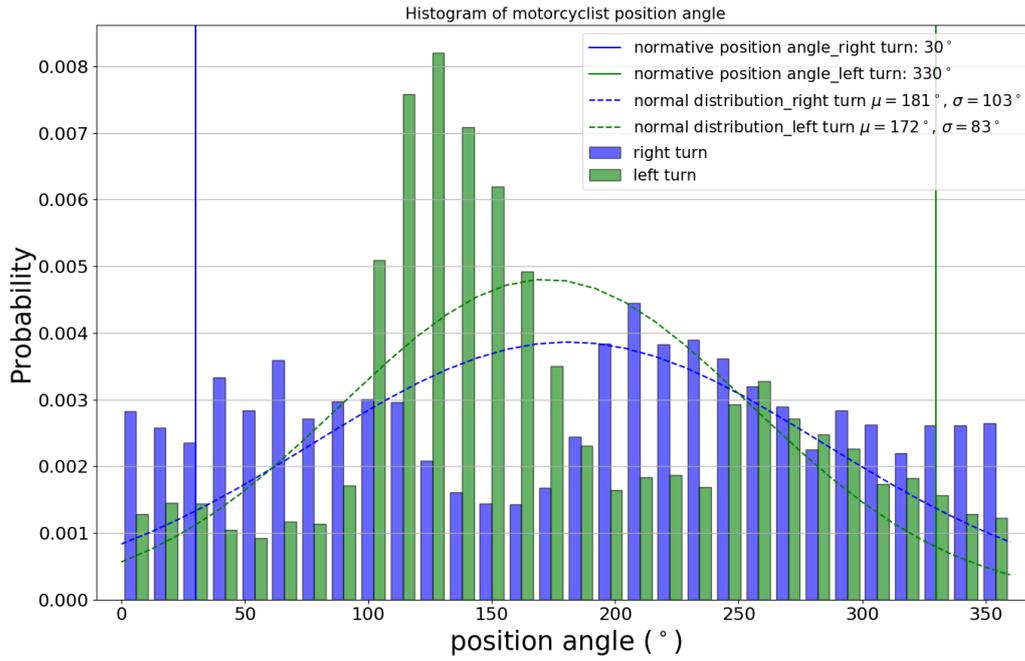


Figure 19 Distribution de l'angle de position

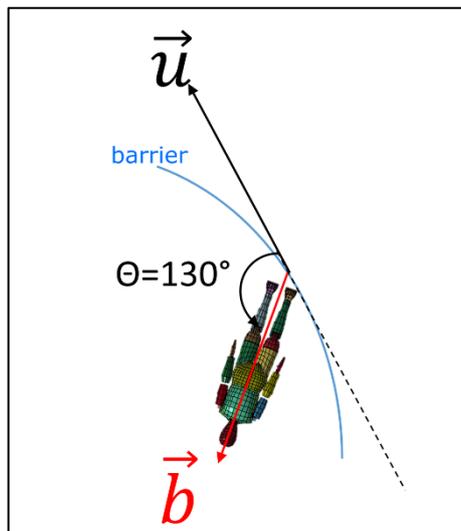


Figure 20 Configuration d'impact, angle de position à 130° en virage à gauche

Analyse de corrélation :

L'analyse de corrélation a été conduite pour étudier la relation entre des paramètres d'entrée (paramètres de chute et typologie de virage) et conditions initiales d'impact.

	impact speed				impact angle				motorcyclist position angle			
	left turns		right turns		left turns		right turns		left turns		right turns	
	CC	p value	CC	p value	CC	p value	CC	p value	CC	p value	CC	p value
lean angle	-0,086	0,000	-0,143	0,000	0,038	0,000	0,035	0,011	-0,177	0,000	0,049	0,000
friction of rear tire/road	0,015	0,137	-0,015	0,291	-0,027	0,006	0,038	0,007	-0,024	0,015	0,032	0,025
pavement width	-0,029	0,004	-0,065	0,000	0,081	0,000	0,258	0,000	0,008	0,440	0,010	0,496
motorcyclist position on the road	0,134	0,000	-0,087	0,000	-0,648	0,000	0,353	0,000	-0,148	0,000	0,025	0,072
impacted curve radius	-0,087	0,000	-0,376	0,000	-0,501	0,000	-0,862	0,000	0,119	0,000	-0,024	0,084
travel speed	0,739	0,000	0,422	0,000	-0,109	0,000	-0,341	0,000	0,012	0,220	0,119	0,000

Tableau 2 Matrice de corrélation

Le Tableau 2 montre le coefficient de corrélation (CC) et la valeur p correspondant entre des paramètres de chute et conditions d'impact. La corrélation a été calculée sur la base de Spearman coefficient car la distribution non normale des données et sa robustesse vis-à-vis des valeurs extrêmes.

Quatre niveaux de corrélation sont colorés dans le tableau de matrice par case blanche, et trois niveaux de couleur marron, de peu profond à profond, représentant respectivement de corrélation négligeable à corrélation élevée, par référence à la règle empirique dans [22], [23].

Concernant la position du motocycliste sur la route, une corrélation négative modérée de -0,648 avec l'angle d'impact a été obtenue en virage à gauche et une corrélation positive plus faible en virage à droite. Plus les motocyclistes sont proches du bord de la route lorsque les motocyclistes perdent leur contrôle, plus l'angle d'impact qu'ils subissent est petit si le motard tourne à gauche.

Le facteur rayon des courbes impactées montre une faible corrélation négative avec la vitesse d'impact en virage à droite par rapport à celle négligeable en virage à gauche. Au contraire, ce paramètre de chute a une influence négative importante sur l'angle d'impact, avec une corrélation négative modérée de -0,501 pour le virage à gauche et un facteur plus élevée de -0,862 pour le virage à droite. Un rayon de courbure plus grand conduit à un angle d'impact plus petit, et ce phénomène est plus manifeste dans le virage à droite.

La vitesse d'impact augmente en fonction de la vitesse de circulation dans les deux sens du virage, en particulier dans les virages à gauche, représenté par un coefficient de 0,739. Cependant la vitesse de déplacement n'a quasiment pas d'influence sur l'angle d'impact dans le virage à gauche, et elle a une faible influence négative de -0,341 pour le virage à droite.

Il convient de noter que l'angle de position du motard n'est pas corrélé à tous les paramètres de chute avec des valeurs de coefficient proches de zéro. Il est probable que la position du motard soit une variable arbitraire qui est indépendante des paramètres de circonstance étudiés ici.

Analyse des relations linéaires : paramètres modérément et fortement corrélés :

Trois relations avec forte corrélation sont présentées ci-dessous sous forme de graph de distribution pour analyser la distribution des conditions d'impact sur valeur de variable : vitesse de déplacement-vitesse d'impact, rayon de courbure impacté-angle d'impact, position du motard sur la route-angle d'impact.

Relation vitesse de déplacement - vitesse d'impact :

Le virage à droite avec CC= 0,422 présente une distribution de vitesse d'impact beaucoup plus étendue à haute vitesse de déplacement en raison de la distance de glissement plus longue (Figure 21). Un coefficient de corrélation plus élevé de 0,739 et une distribution plus dense à vitesse de déplacement élevée sont constatés pour le virage à gauche. Cela indique qu'à vitesse de déplacement élevée, chuter en virage à droite semble être moins dangereux du point de vue de la vitesse d'impact en supposant qu'aucun autre véhicule ne vienne dans le sens inverse.

On peut également noter que la vitesse nominale d'impact tombe dans la plage de vitesse de déplacement de 70 km/h à 90km/h. Pour une vitesse de déplacement plus élevée, supérieure à 90km/h et à la limite légale, la question d'évaluer la performance des dispositifs de retenue se pose.

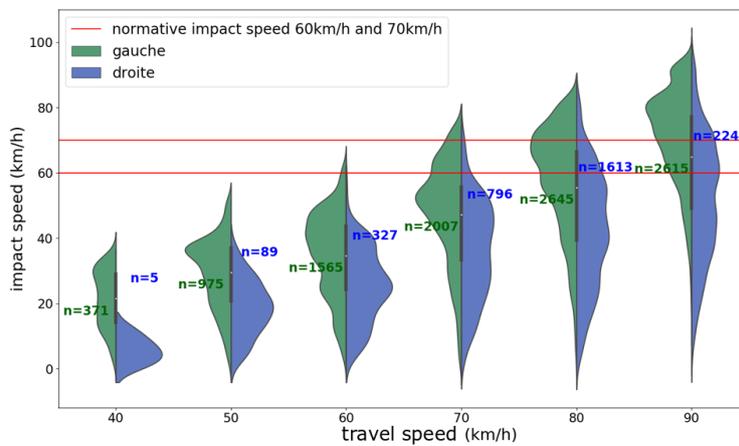


Figure 21 Distribution de vitesse d'impact en fonction de vitesse de déplacement

Relation rayon de courbure impacté - angle d'impact :

La Figure 22 indique que presque tous les angles d'impact sont inférieurs à l'angle normatif d'impact 30°, à l'exception des virages à droite à 50m. L'effet de la courbure sur l'angle d'impact n'est plus sensible qu'en dessous de 200m. La norme, selon notre résultat, pourrait être associée à un petit rayon de courbure égal à 50 m.

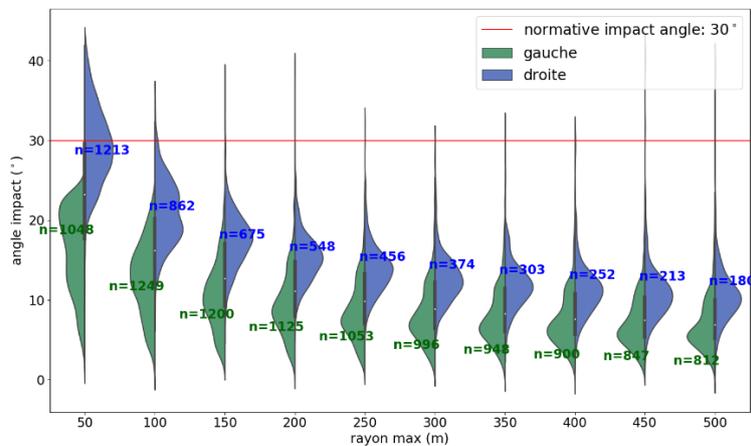


Figure 22 Distribution de l'angle d'impact en fonction du rayon de courbure impacté

Relation position du motard sur la route - angle d'impact :

La Figure 23 montre une tendance totalement différente entre le virage à gauche et à droite, concernant les effets de la position du motocycliste sur l'angle d'impact. Plus le motard est proche du bord de la route, l'angle d'impact est plus petit et sa distribution est plus dense si on tourne à gauche.

Selon la nouvelle formation au permis de conduire moto en France, pour un conducteur conduisant normalement, il se place généralement au bord de la route (95 %) lorsqu'il tourne à gauche, et près de la ligne médiane (50 %) lorsqu'il tourne à droite. Par conséquent, à cet égard, les motocyclistes pourraient ne pas subir un angle d'impact supérieur à celui de la norme.

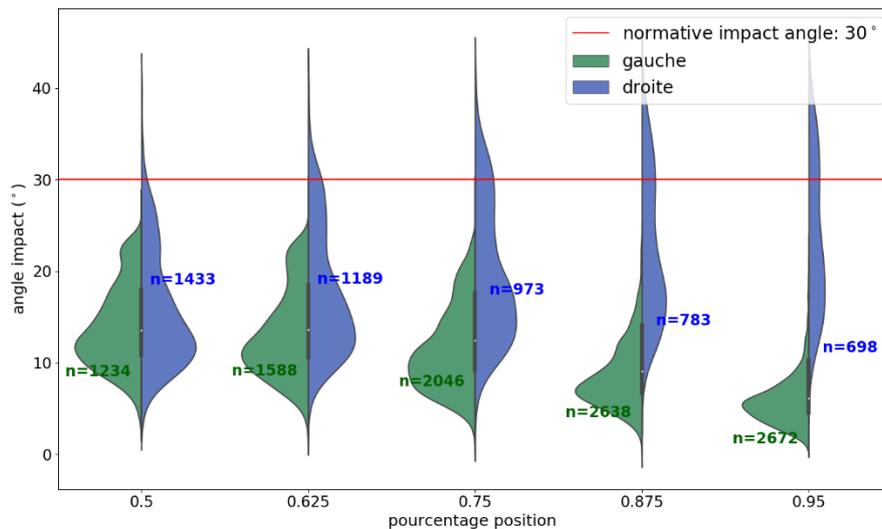


Figure 23 Distribution de l'angle d'impact en fonction de la position du motard sur la route

2.6 Discussion et conclusion

Au niveau de la vitesse d'impact, le virage à gauche présente une distribution plus réduite et l'amplitude de vitesse plus élevée.

Au niveau de l'angle d'impact, pour un conducteur qui respecte strictement la technique pour négocier le virage, en général, ne souffrirait pas d'un angle d'impact supérieur à l'angle normatif de 30°. Cependant si la chute a lieu dans un virage à droite avec un rayon inférieur ou égal à 50m, le motard risque de subir un angle d'impact plus important.

Quant à l'angle de position du motard, l'impact tête et pied ont une probabilité équivalente en virage à droite. Alors qu'en virage à gauche, l'impact pied apparaît plus fréquemment, avec le maximum de probabilité trouvé à l'angle de position 130° selon notre propre définition de l'angle. D'ailleurs, la position du motard s'avère non corrélée avec d'autres paramètres, mais supposé dépendant de la réaction du motard, toutefois, actuellement le dernier est difficile à prendre en compte.

Actuellement, peu de recherches étudient l'impact des membres inférieurs sur dispositifs de retenue qui est généralement estimé fréquent mais rarement mortel. Cependant, la conséquence de ce genre d'impact sur des critères de blessures n'est pas encore explorée. Cela deviendra un problème à envisager dans la future.

De plus, la question reste de savoir si le sens du virage a une influence sur la survenue de l'accident et sa gravité. Selon l'étude [10] sur 84 accidents de perte de contrôle survenues en courbe, une prédominance des configurations de courbe à gauche (67%) est constatée par rapport au virage à droite (33%). C'est probablement dû au fait que la voie inverse constitue une bonne zone de récupération, permettant d'éviter les accidents dans la courbe de droite en cas de faible trafic. Cette prédominance est d'ailleurs cohérente parfaitement avec la répartition des points d'impact dans notre simulation de chute motard.

Il est difficile de conclure de cette étude quel sens du virage entraîne des accidents les plus sévères. D'une part, le virage à gauche pourrait être considéré comme plus dangereux que le virage à droite pour sa vitesse d'impact plus élevée à la même vitesse de circulation. D'autre part, les grands angles d'impact survenus en virage à droite vont aggraver la sévérité. Cet aspect nécessite des études et des développements plus profonds.

En conclusion, peu de l'information dans la bibliographie est menée pour étudier la distribution statistique de probabilité de perte de contrôle et peu d'information sur la statistique des typologies de virage. Cela implique que la distribution des résultats obtenus ne présage pas la probabilité des conditions initiales d'impact dans la réalité. Par contre, les résultats présentent le champ des conditions initiales d'impact possibles.

3 Influence des conditions initiales d'impact sur les performances du dispositif de retenue

3.1 Introduction

Le but de cette deuxième partie est donc d'étudier l'influence de ces conditions initiales d'impact sur les performances du dispositif de retenue.

Un modèle numérique d'impact motard sur dispositif de retenue dans un premier temps a été construit et ensuite validé par des essais normatifs, conduits dans le cadre de la campagne Inter laboratoires¹ (Annexe A) [24].

Un 1^{er} plan d'expérience vise à étudier l'influence des petites variations des conditions initiales d'impact autour des conditions nominales définies dans le cadre de la norme. L'effet des conditions initiales d'impact sur chaque critère de blessure a été évalué. Ensuite un 2^{ème} plan d'expérience est réalisé en faisant varier le paramètre « position du motard », qui est un paramètre figé dans la norme EN1317-8.

Selon le résultat des plans d'expérience, deux essais expérimentaux d'impact du motard sur dispositifs de retenue différents de la configuration normative sont réalisés sur piste en collaboration avec Transpolis.

3.2 Modèle numérique d'impact motard

Le modèle numérique d'impact motard est composé d'une barrière équipée d'écrans motards SPM-ES2 du fabricant HIASA, d'un modèle numérique du mannequin Hybrid III casqué ainsi qu'un mur

¹ Les accords retenus pendant la réunion du WG1 à Madrid entre 6 laboratoires et un fabricant de barrière pour réaliser une série de tests selon TS 1317-8

rigide modélisant le sol. La barrière est construite à partir de la même barrière d'essai « Inter laboratoires », du fabricant HIASA.

La barrière fait 32m en longueur. Elle est construite en élément coque dans LS-DYNA. Le coefficient de frottement motard-sol est fixé à 0.7 selon le résultat de la 1^{ère} partie.

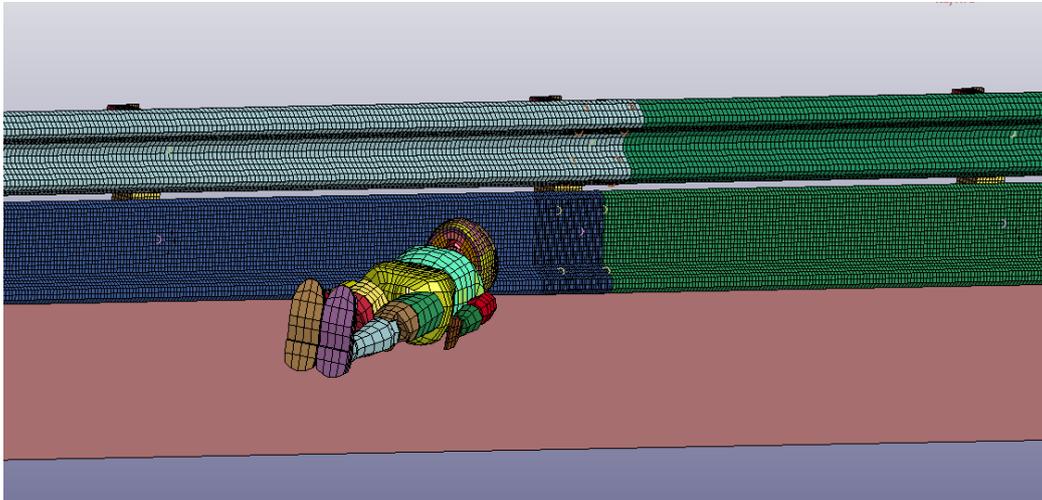


Figure 24 Modèle numérique d'impact motard

Étude paramétrique sur la hauteur d'impact :

La hauteur d'impact est un paramètre imprécis dans la norme EN1317-8. Il s'agit dans notre définition, de la distance entre le point plus bas de casque au sol (Figure 25). On a découvert pendant l'essai que la tête rebondit sur le sol avant d'impacter à la barrière, ce qui implique la variation de hauteur d'impact en fonction du mouvement de la tête. C'est un paramètre donc à la fois inconnu et mal maîtrisé en pratique, mais il convient de quantifier son influence sur les critères de blessure. En effet, l'impact a lieu dans une zone de la barrière où il y a une variation significative de la géométrie avec la hauteur. Il en résulte une variation de raideur de choc et des conséquences sur des critères de blessures.

Par conséquent, l'étude paramétrique sur la hauteur d'impact s'est établie pour évaluer son effet sur la performance d'écrans motards. Elle est basée sur la configuration normative, en faisant varier la hauteur d'impact de [0mm, 10mm, 20mm, 30mm, 40mm, 50mm et 60mm]. Des critères de blessures sont calculés et comparés avec des valeurs limites de la norme.

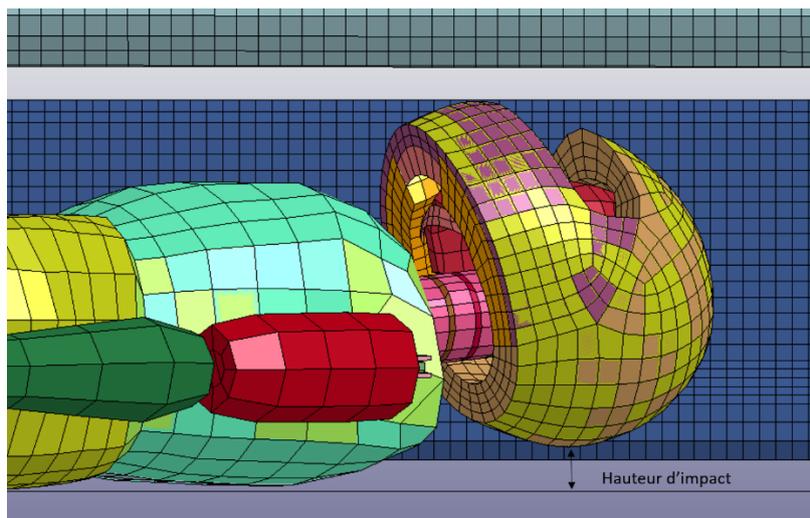


Figure 25 Définition de la hauteur d'impact

Le résultat montre que la force de compression du cou (Z force) est plus sensible à la variation de la hauteur (Figure 26). Au-delà de 50mm, le niveau de sévérité passe du niveau I à II. Les autres critères n'ont pas de variation significative avec la hauteur d'impact, au moins que la classe de sévérité n'est pas affectée.

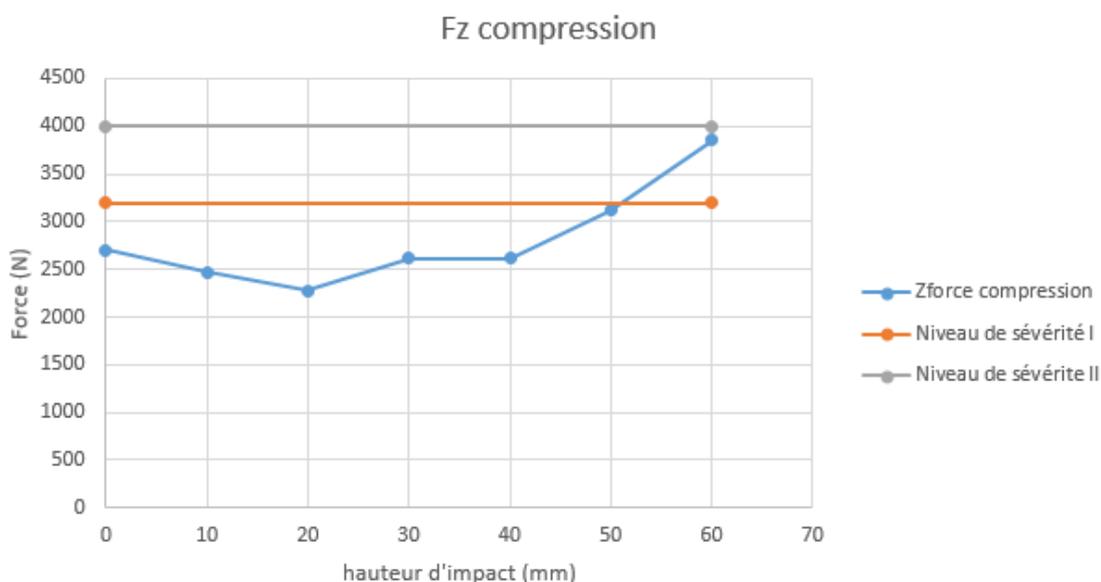


Figure 26 Effet de la hauteur d'impact sur force de compression

Selon l'étude paramétrique et l'analyse du vidéo d'essai, la hauteur de 40mm est prise pour les simulations suivantes.

Étude paramétrique sur le coefficient de frottement motard-barrière et casque-barrière :

Dans cette partie, l'influence de deux coefficients de frottement motard-barrière et casque-barrière vont être étudiées. Difficile à mesurer et à maîtriser pendant l'essai, le coefficient de frottement avec la barrière est également un paramètre inconnu mais influent dans l'essai d'impact motard.

Coefficient de frottement casque-barrière :

Dans un premier temps, des résultats concernant des critères de blessures seront comparés avec les résultats Inter laboratoires lors de la variation du coefficient de frottement casque-barrière.

On peut voir que le coefficient de frottement casque-barrière influence principalement le début de l'impact, particulièrement pour le moment M_{ocx} et la force de direction Z du cou F_z . Les variations du moment et de la force en fonction du coefficient de frottement sont illustrées dans les Figure 27 et Figure 28.

On remarque dans la Figure 27, plus le frottement entre casque et barrière est grand, plus la force de compression au cou est importante en passant du niveau de sévérité I à l'échec. Ce qui implique également la moindre présence de force de traction au cou juste après compression. Concernant le moment, un frottement plus important entre le casque et la barrière va amplifier la valeur maximale du moment M_{ocx} .

Enfin, un coefficient de frottement de 0.2 est trouvé plus corrélé en comparant avec les résultats expérimentaux d'Inter laboratoires (Annexe **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

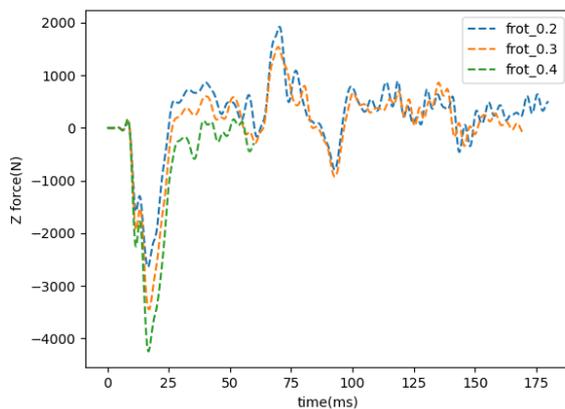


Figure 27 Force de compression pour trois différents coefficients de frottement casque-barrière

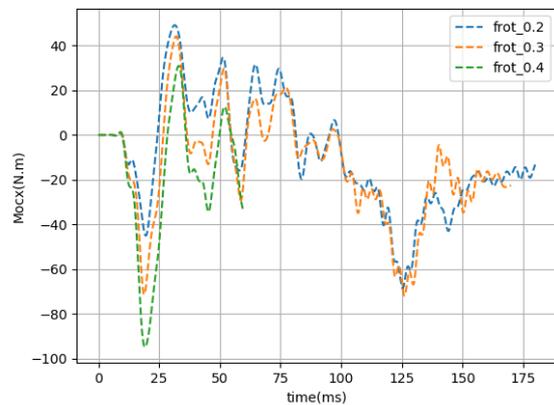


Figure 28 Moment M_{ocx} pour trois différents coefficients de frottement casque-barrière

Coefficient de frottement entre motard-barrière :

Le coefficient de frottement entre motard-barrière va influencer le comportement du motard lorsqu'il glisse sur barrière après l'impact. Il pilote considérablement l'évolution du moment M_{ocx} et M_{ocy} .

D'après les résultats expérimentaux, les moments au cou du mannequin s'oscillent autour de zéro. Pour mieux corréliser avec l'essai, de différents coefficients [0.2, 0.4, 0.6, 0.7] sont testés. Selon le résultat (Annexe C), le coefficient de 0.6 a été choisi.

La surface de contact plus lisse entre motard et barrière provoque un coefficient de frottement plus faible que 0.7 sachant que ce dernier correspond au coefficient de frottement entre motard-sol. D'où la raison pour laquelle la valeur de 0.6 a été sélectionnée.

Validation du modèle numérique d'impact motard :

Après avoir réalisé des études paramétriques, on valide le modèle numérique d'impact motard en donnant des valeurs appropriées pour des paramètres inconnus dans la configuration d'impact

normative (vers poteau, 60km/h et 30°). Des résultats numériques seront comparés avec les résultats d'essais. Les essais ont été conduits dans le cadre de la compagnie « Inter laboratoires » avec trois laboratoires participés : Transpolis (France), CIDAULT (Espagne) et CSI SPA (Italie). Pour un type d'essai, par exemple TM1.60 (signifie l'impact contre le centre du poteau, à 60km/h et à 30°), l'essai a été répété deux ou trois fois par les laboratoires.

Les comparaisons des résultats numériques et expérimentaux concernant des efforts/moments au cou sont en Annexe D. En général, selon les graphes de l'évolution des efforts/moments, les résultats de simulation sont bien corrélés avec les résultats expérimentaux. L'incohérence des moments est constatée après 100ms, donc des critères de blessure de simulation ci-dessous (Tableau 3) sont relevés avant 100ms. Les résultats de simulation rentrent bien dans la classe de sévérité et cohérents avec des essais. On peut donc conclure que le modèle numérique d'impact motard est validé.

Lab	Test Type	Test Code	HIC36	Fx (level)	Fz traction(level)	Fz comp.(level)	Mocx(Nm)	Mocy ext. (Nm)	Mocy flex. (Nm)
TRANSPOLIS	TM1.60	TPSESM0051	254	I	I	I	68	42	40
		TPSESM0052	248	I	I	II	68	36	61
		TPSESM0053	472	I	I	II	68	42	43
CSI	TM 1.60	RR1	293	I	I	I	64	32	54
		RR2	122	I	I	I	59	47	73
CIDAUT	TM 1.60	E12-1467	143	I	I	I	59	40	41
		E12-1469	113	I	I	I	55	32	37
		E12-1562	101	I	I	I	60	40	67
Résultat de simulation	TM1.60		193	I	I	I	69	24	31

Tableau 3 Résultat des essais et simulation

Niveau de sévérité	HIC36	Fx maxi(N)	Fz tract. maxi(N)	Fz comp. maxi (N)	Mocx (Nm)	Mocy ext. (Nm)	Mocy flex. (Nm)
I	650	1900	2700	3200	134	42	190
II	1000	3100	3300	4000	134	57	190

Tableau 4 Niveau de sévérité

3.3 Analyse de sensibilité

Dans cette partie, deux plans d'expériences ont été menés pour respectivement étudier l'influence des petites variations des conditions initiales d'impact à partir de la configuration normative, ainsi l'effet de l'angle de position sur la sévérité des impacts, notamment l'impact motard pied en premier.

1^{er} plan d'expérience – petites variations des conditions d'impact dans la configuration normative :

Partant de la configuration normative d'impact, trois conditions initiales d'impact seront variées à deux niveaux et l'effet de ces trois conditions d'impact sera évalué sur la performance d'écrans motards. Le Tableau 5 décrit des variables et son niveau.

Facteurs	Niveau -1	Niveau +1
Position longitudinale du motard	-10 cm	+10 cm
Angle de position	-2°	+2°
Vitesse d'impact	- 3km/h	+ 3km/h

Tableau 5 Description des variables

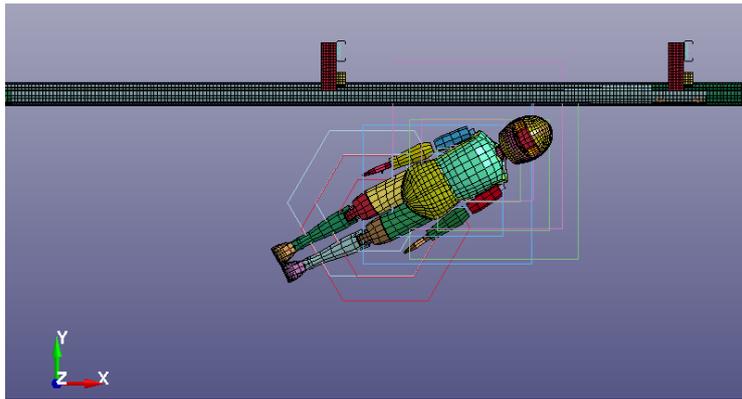


Figure 29 Configuration normative d'impact

position longitudinal	angle position	vitesse impact
-10	-2	-3
10	-2	-3
-10	2	-3
10	2	-3
-10	-2	3
10	-2	3
-10	2	3
10	2	3
0	0	0

Tableau 6 Plan d'expérience complet, plus un point central

Le Tableau 6 montre un plan d'expérience complet plus un point central. Au total 9 simulations ont été effectuées. Les résultats de critères de blessure et l'analyse des effets principaux des facteurs seront présentés en Annexe E. Seuls des facteurs statistiquement significatifs seront interprétés :

- HIC36 : parmi les trois facteurs, la vitesse d'impact a un effet positif plus important et le HIC passe de 170 à 235 entre deux niveaux ;
- Fx : l'angle de position est plus sensible à Fx. Plus le motard s'éloigne de la barrière, plus Fx est grand ;
- Fz traction : l'angle de position et la vitesse d'impact ont des mêmes conséquences sur la force de traction au cou ; Le fait que le motard s'éloigne de la barrière ou la vitesse d'impact augmente, peut provoquer la croissance de la force de traction au cou, de l'ordre 300-500N ;
- Fz compression : la force de compression au cou est affectée positivement par la position longitudinale et la vitesse d'impact. Plus le point d'impact est proche du poteau, plus la force de compression est importante ;
- Mox : aucuns facteurs ne sont significatifs ;
- Mocy extension et flexion : l'angle de position est statistiquement significatif pour le moment Mocy mais son influence n'est pas considérable en petite variation.

2^{er} plan d'expérience - Effet de l'angle de position sur la performance d'écrans motards :

Dans ce plan d'expérience, on va étudier l'effet de l'angle de position à grande variation sur la performance d'écrans motards sachant que son effet est peu étudié dans des recherches/simulations.

En partant de la configuration normative d'essai pour laquelle l'angle de position est de 30° dans le cas virage à droite, on changera la position du motard en variant l'angle de position. Le changement est fait par la rotation du mannequin par rapport à son centre de gravité. La trajectoire d'approche du mannequin reste inchangée comme la Figure 30. L'angle de position sera varié de 0 à 360° avec 30° d'écart.

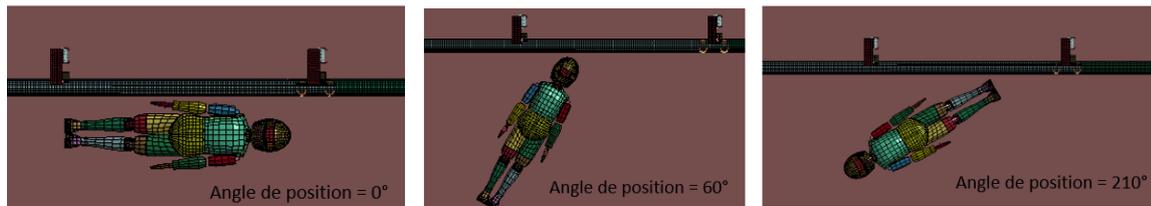


Figure 30 Configuration d'impact pour de différents angles de position

Le Tableau 7 montre les résultats des critères de blessure pour les différents angles de position. Il est à noter qu'un angle de position [0,180°] correspond à des configurations d'impact tête alors qu'un angle de position [180°,330°] correspond à des configurations d'impact pieds. Les valeurs des critères au-delà des limites sont marquées en gras.

Angle de position	HIC36	Fx(N)	Fz traction (N)	Fz compression (N)	Mocx (Nm)	Mocy extension (Nm)	Mocy flexion (Nm)
0	151	365	1406	1294	55	9	22
30	196	520	1002	2535	51	19	39
60	107	650	2416	5708	50	35	67
90	176	1378	4164	5794	105	49	19
120	234	535	2652	2973	90	55	61
150	225	266	1437	1084	75	16	35
180	213	126	1125	656	32	4	21
210	687	303	1896	555	49	8	27
240	416	236	1310	671	62	21	41
270	139	3704	2128	2402	68	45	124
300	465	2589	671	3014	96	26	124
330	680	476	1840	2382	114	32	68

Tableau 7 Résultats du 2^{ème} plan d'expérience

Discussion :

- Dans des configurations d'impact tête en premier, la position du motard n'a pas de conséquence significative sur le HIC. Il y a cependant des effets positifs sur les forces du cou, particulièrement quand l'angle de position varie entre 0 et 90°. Lorsque la tête du motard est dirigée dans le sens de déplacement, la force de cisaillement Fx et les forces de traction compression Fz augmentent considérablement selon l'angle de position. Une variation d'angle de 30° à 60° double les forces de traction compression.

- Pour des configurations d'impact pied en premier, des valeurs de HIC plus importantes sont observées alors que le cou subit moins d'effort par rapport à l'impact tête. Ces constats sont bien démontrés par des couples de simulation « 30°-210° » et « 60°- 240° ».

Conclusion :

Pour conclure, selon les résultats du 1^{er} plan d'expérience, de petites variations des paramètres ont parfois des conséquences importantes sur la performance des écrans motards. 2° d'augmentation sur l'angle de position ou 3km/h de plus sur la vitesse d'impact peuvent conduire à l'échec de l'évaluation de la performance des écrans motards. Il est donc important de maîtriser des paramètres les plus possibles avant l'essai.

Le 2^{ème} plan d'expérience consistant à faire varier l'angle de position du motard à grande valeur met à disposition des configurations d'impact différentes que la norme. Représentant la position du motard par rapport à la barrière, l'angle de position est un paramètre beaucoup moins étudié par des recherches alors qu'il joue un rôle non négligeable sur le résultat.

Le résultat du 2^{ème} plan d'expérience montre l'influence du côté d'impact (pied ou tête) sur des critères de blessure. Avec le même angle entre la barrière et l'axe du mannequin, l'impact tête provoque des efforts au cou plus importants que l'impact pied. Néanmoins, l'impact pied semble générer des blessures plus graves à la tête car des HIC sont trouvés plus importants.

3.4 Essais expérimentaux d'impact motard

L'analyse de sensibilité nous permet de configurer des essais sur piste. Au final, deux essais sur piste de l'impact motard sur dispositifs de retenue ont été réalisés dans le laboratoire Transpolis : un impact tête à 60° et un impact pied à 30°.

3.4.1 Dispositifs d'essai

Des dispositifs d'essai sont constitués de :

- Chariot de catapulte (Figure 32)
- Mannequin Hybrid III habillé et casqué
- Barrières équipées d'écrans motards (Figure 31)
- Caméras rapides

Le sol a été couvert par un film plastique entre l'arrêt du chariot et l'arrivée de barrière dans le but de minimiser le frottement au sol et garder la même vitesse de projection lors de l'impact.



Figure 31 Barrière équipée d'écrans motards



Figure 32 Chariot de catapulte et mannequin

3.4.2 Configurations d'essai

Deux configurations d'essai ont été choisies selon le résultat de l'analyse de sensibilité :

- Impact tête - 60° : Impact motard tête en premier, avec l'angle de position de 60° ;
- Impact pied - 30° : Impact motard pied en premier, avec l'angle de position de 150° selon notre définition de l'angle, d'où 30° entre la barrière et l'axe du mannequin.

Ces deux essais sont tous lancés à vitesse normative d'impact et angle normative d'impact.

Les Figure 33 et Figure 34 montrent des photos pris pendant l'essai. Il est remarqué que les conditions d'essai du motard, notamment la position du motard, sont un peu décalé des conditions de définition à cause des nombreuses incertitudes lors de l'installation de l'essai.

Des conditions initiales d'impact sont en effet pour :

- Impact tête - 60° : vitesse d'impact approximativement égale à la vitesse du chariot enregistrée = 62km/h, angle de position = 66° ;
- Impact pied - 30° : vitesse d'impact approximativement égale à la vitesse du chariot enregistrée = 62km/h, angle de position = 22° ;



Figure 33 Essai d'impact du motard tête, 60°

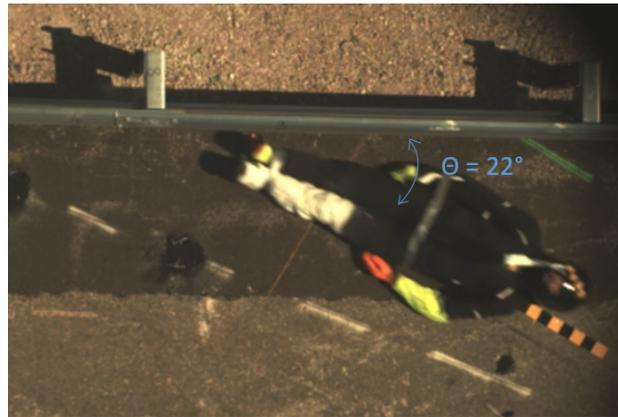


Figure 34 Essai d'impact du motard pied, 30°

3.4.3 Résultats

La comparaison des résultats se divise en trois parties : Comparaison sur la cinématique du motard, comparaison sur l'évolution des efforts au niveau du cou et comparaison des valeurs de HIC36.

Impact du motard pied 30° :

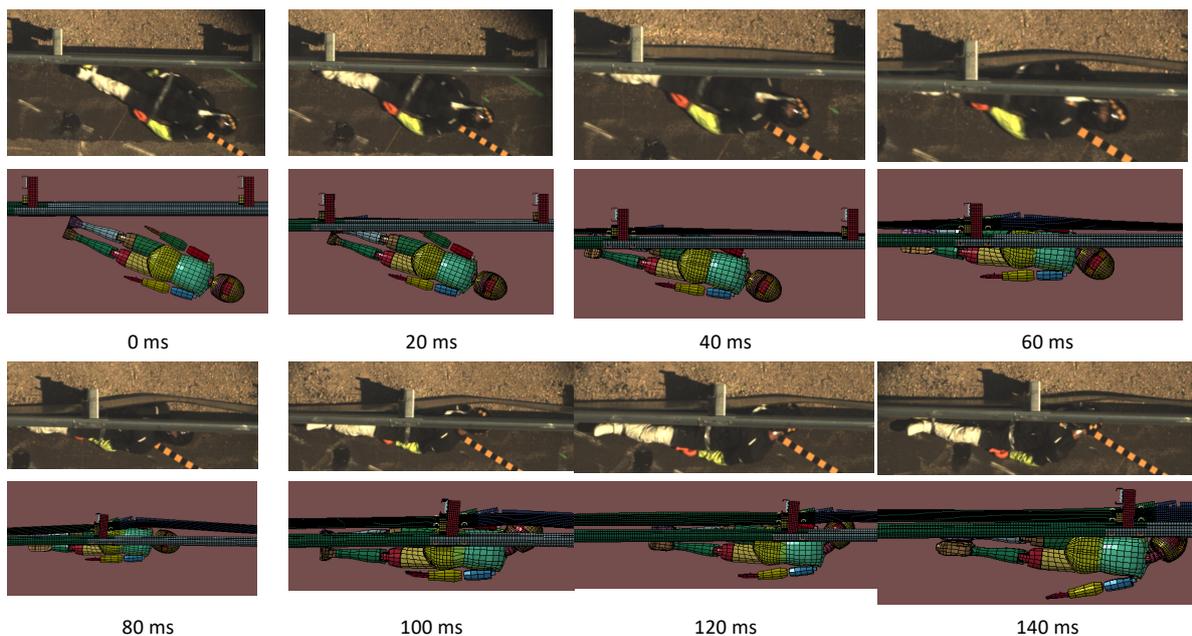


Figure 35 Cinématique de l'impact pied motard

La Figure 35 montre une bonne corrélation générale de la cinématique entre la simulation et l'essai. Cependant il est à noter que à 40ms, le mannequin numérique présente la flexion au niveau du cou avant que la tête impacte sur barrière alors que dans l'essai, le cou reste droit. Cette différence du cou, un coup de fouet du cou en simulation engendre un HIC36 et des efforts du cou plus importants par rapport à l'essai (Tableau 9Tableau 9 Valeur de HIC). Le cou du vrai mannequin semble plus raide par rapport à celui du modèle et donc il apporte des critères de blessure moins importants en essai.

La Figure 36 montre la comparaison des efforts du cou en simulation et en essai. Comme les données d'essai enregistrées ne sont pas synchronisé avec la survenue de l'impact, la calibration des signaux se fait par rapport le point de changement de signe de F_y .

La différence de comportement du cou est aussi traduite par la variation de F_y : La F_y est positive d'abord ensuite passe au négatif dans la simulation. Le déphasage entre les signaux expérimentaux et numériques est probablement dû à la recherche de point de calibration et des incertitudes pendant le glissement du motard sur barrière avant l'impact de la tête. Mais en général, des tendances sont reproduites.

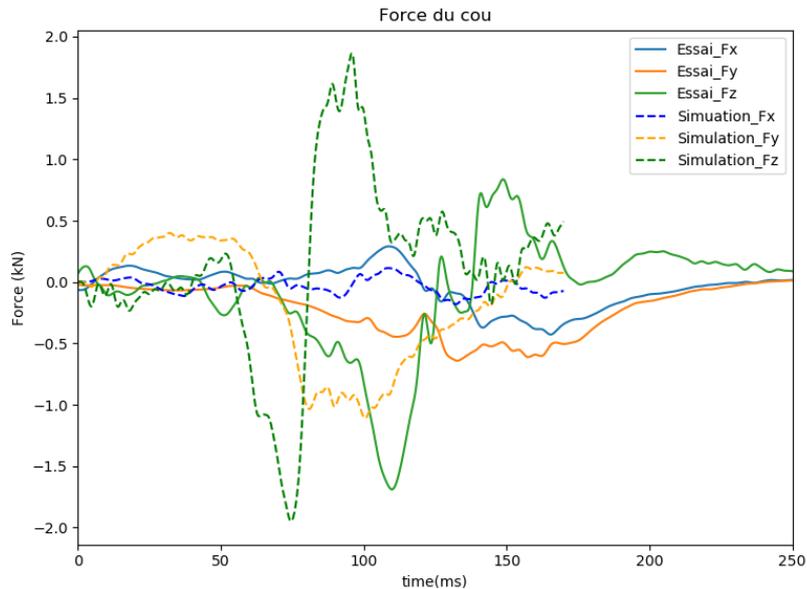


Figure 36 Comparaison des efforts du cou pour l'impact pied 30°

	Fx(N)	Fz traction(N)	Fz compression(N)	Mocx (Nm)	Mocy flexion (Nm)	Mocy extension (Nm)
Essai impact motard pied	292	839	1688	54	14	25
Simulation	114	1864	1947	61	25	19

Tableau 8 Efforts et moments du cou

	Essai impact motard pied	Simulation	Essai normatif Transpolis	Essai normatif CIDAUT	Essai normatif CSI
HIC36	131	493	254 ; 248 ; 472	293 ; 122	143 ; 113 ; 101

Tableau 9 Valeur de HIC

Comme mentionné précédent, des configurations normatives ont été réalisées dans trois laboratoires différents avec répétitions. En comparant l'essai pied avec l'essai normatif, on constate que l'essai pied a une valeur de HIC autant important que l'impact tête (essai normatif), même si les résultats de HIC se varient entre des répétitions et entre laboratoires dus aux différences facteurs de circonstance en essai (surface du sol, raccordement entre écrans, hauteur du système etc.) (Tableau 9).

Impact du motard tête 60° :

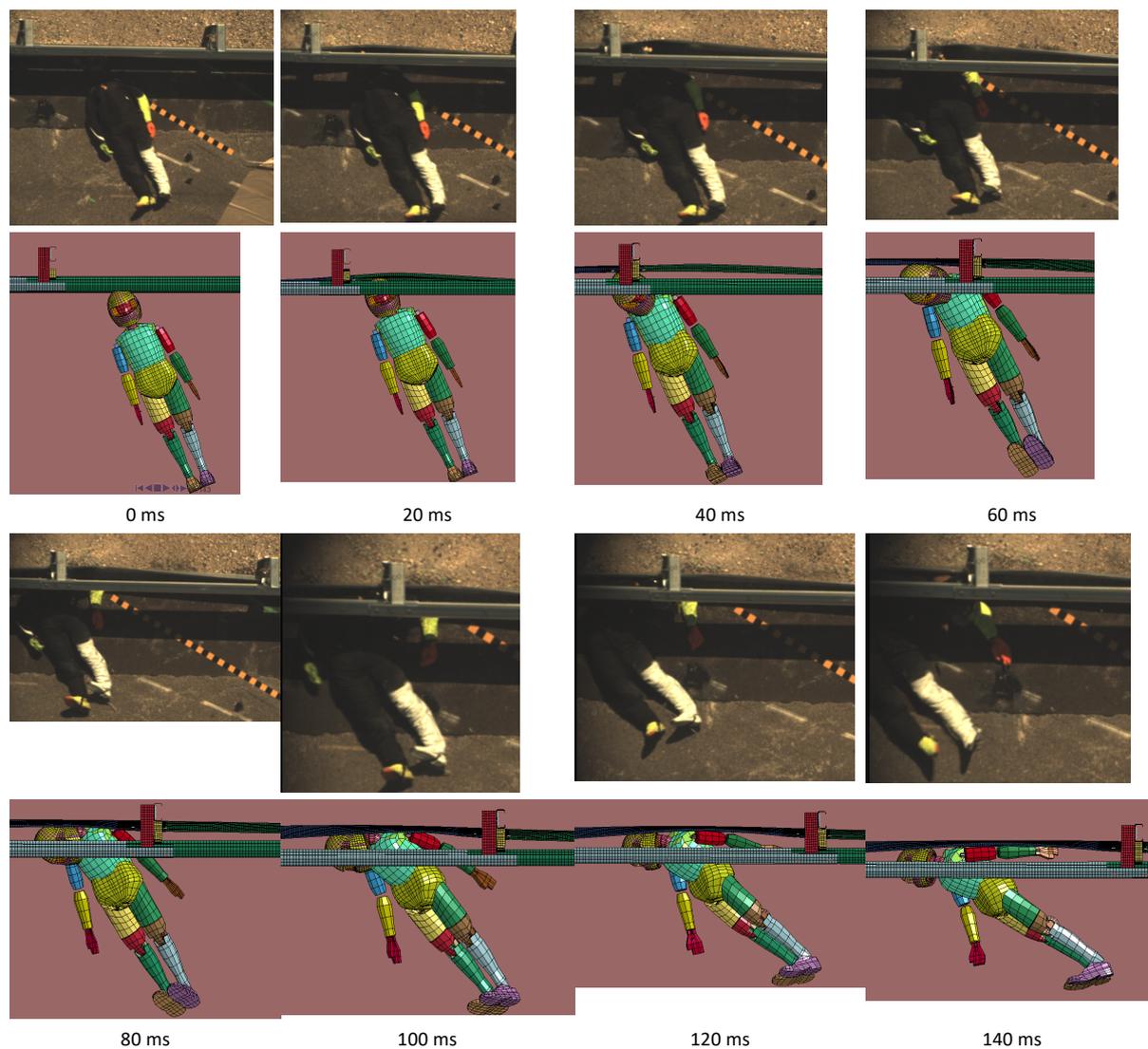


Figure 37 Cinématique de l'impact tête motard

Pour l'impact du motard tête à 60°, la cinématique du cou au moment de l'impact est totalement différente. En simulation, le cou est fléchi dans la direction de déplacement (vers la gauche de l'image) ensuite le motard glisse sur barrière alors que dans l'essai, le cou se tourne vers la droite de l'image, ce qui induit une rotation du corps du mannequin dans le sens opposé sans glisser la barrière. Cette différence de cinématique ne permet malheureusement pas de faire des analyses plus profondes.

Mais si on compare l'évolution des efforts du cou dans les 40 premières millisecondes (Figure 38), on voit qu'au début de l'impact, le cou a subi des forces d'amplitude équivalente dans l'essai et la simulation, surtout pour la force de compression (F_z). La force de compression expérimentale obtenue ici, égale à 6800N, est beaucoup plus importante que celle de l'essai normatif. Cela implique que la position du motard par rapport à la barrière est également un paramètre considérable et qui devrait être prise en compte dans des études paramétriques sur l'évaluation de performance d'écrans motards.

Cet écart de cinématique peut être expliqué par la rigidité différent du cou du mannequin, par des paramètres mal maîtrisés (frottement, point d'impact etc.) dans le contact de casque-barrière et aussi par le comportement dans le contact tête-casque.

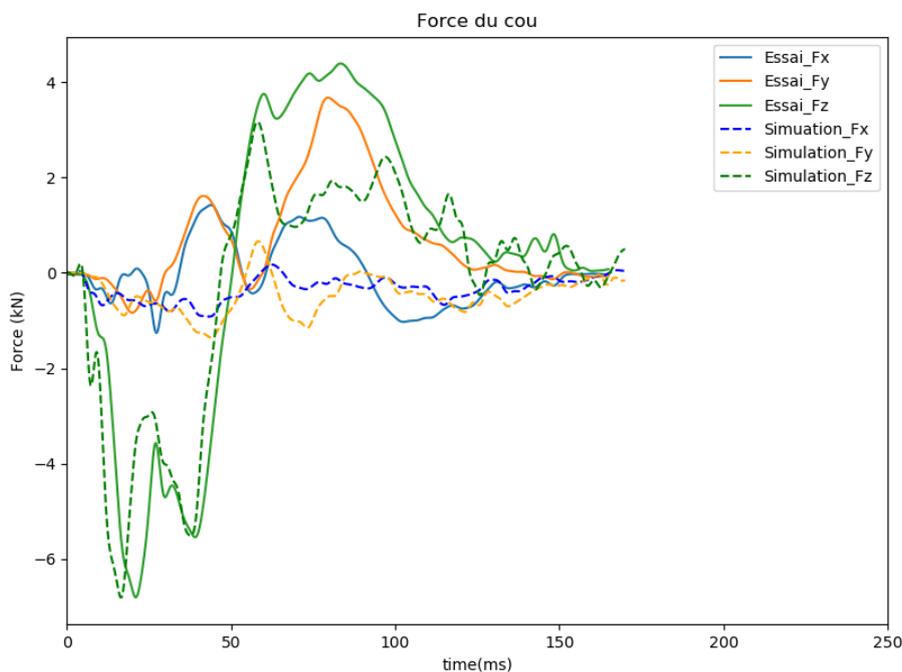


Figure 38 Comparaison des efforts du cou pour l'impact tête 60°

3.5 Conclusion

L'étude sur l'influence de la hauteur d'impact et du coefficient de frottement sur la performance d'écrans motards a été étudié au début de chapitre et elle montre que ces paramètres sont mal déterminés en essai mais peuvent apporter de grandes variations sur les performances du dispositif.

Des analyses de sensibilité sur des conditions initiales d'impact (position longitudinale du point d'impact, angle de position du motard et vitesse d'impact) nous montrent qu'une petite variation dans la configuration normative de l'essai peut produire de grandes différences sur la performance des écrans motards, voire conduire à l'échec de l'évaluation. Cet effet est notamment remarqué pour les paramètres « angle de position du motard » et « vitesse d'impact ».

Le deuxième plan d'expérience consiste à étudier l'effet de l'angle de position en grande variation. Le résultat montre d'un part, que l'impact pied peut générer des HIC plus importants, d'autre part, l'augmentation de l'angle de position va amplifier des forces au cou en impact tête. Ces résultats permettent de configurer les essais expérimentaux suivants.

Quant aux résultats des essais, ils sont moins cohérents avec ce que nous attendions. L'impact pied n'a pas généré un HIC plus grave par rapport à la configuration normative mais une valeur approximativement équivalente. La différence est probablement due à la rigidité du cou du mannequin dans le modèle numérique. Mais cela implique quand même que la configuration normative n'est pas forcément plus sévère puisque l'impact pied s'accompagne également d'un HIC important.

Pour l'essai d'impact tête à 60°, la cinématique n'est pas complètement corrélée avec la simulation. Cependant l'amplitude de la force de compression est équivalente entre essai et simulation au début de l'impact et cette force est beaucoup plus sévère par rapport à celle de la configuration normative.

4 Conclusions & perspectives

La procédure d'essai européenne CEN/TS 1317-8 implique des essais expérimentaux d'impact mannequin avec des conditions a priori très défavorables (vitesse d'impact, impact au niveau de la tête, angle d'incidence assez important...). La sévérité des dispositifs de retenue motard est donc évaluée sur la base des critères de blessure obtenus à partir des mesures réalisées sur le mannequin.

Si ces essais sur piste sont nécessaires, la présente étude montre qu'ils ne sont pas suffisants et que des simulations numériques pourraient compléter l'évaluation de la sévérité des dispositifs.

La première partie de l'étude a permis d'améliorer les connaissances sur les conditions initiales d'impact d'un motard sur les dispositifs de sécurité, sujet pour lequel très peu d'informations sont disponibles dans la littérature. L'étude est basée sur la simulation numérique de la chute d'un motard en virage. Le modèle est validé à partir d'essais réalisés spécifiquement sur piste. La principale hypothèse et limite du modèle numérique développé est la passivité du mannequin. Par ailleurs un seul modèle de motocycle et un seul mannequin ont été modélisés. Ces hypothèses sont compensées par la grande diversité de perte de contrôle étudiées (chutes motard) et le grand nombre de configuration de virages. Au final, une base de données avec plus de 15 000 impacts motard sur dispositif de retenue est constituée. L'analyse des résultats montre une différence marquée pour les conditions d'impact dans le cas des virages à gauche et à droite. Le champ des conditions initiales d'impact possible est ainsi obtenu en termes de vitesse d'impact, d'angle d'impact, de position du motard.

La seconde partie de l'étude est basée sur la modélisation numérique de l'impact d'un motard sur un dispositif de retenue. Plusieurs analyses de sensibilité ont été réalisées. Il en résulte :

- Une petite variation des conditions d'impact va générer des différences significatives sur des critères de blessures.
 - Vis-à-vis des essais actuels de la procédure normative, il a été montré que des paramètres difficilement maîtrisables durant l'essai ont une influence conséquente sur les résultats et donc sur l'évaluation du dispositif (hauteur d'impact de la tête, coefficient de frottement).
 - Vis-à-vis des conditions initiales d'impact : pour l'essai d'impact pied, la tête n'est pas première impactée, alors des incertitudes (point d'impact, frottement...) lors du glissement du corps du motard sur barrière avant l'arrivée de la tête ont des conséquences non négligeables sur le comportement global du mannequin.
- L'impact tête en premier comme défini dans la norme, ne représente pas forcément la configuration la plus critique, puisque dans des mêmes conditions, l'impact pied génère un HIC aussi important que l'impact tête.

En outre, les configurations normatives qui considèrent deux points d'impact sont très orientées sur les dispositifs historiques disposant de supports métalliques. La présence ou l'absence de dispositif d'écartement rend les points d'impact définis dans la norme plus ou moins pertinents. Une approche numérique qui prendrait en compte la multiplicité des conditions d'impact prend ici tout son sens.

Selon les résultats des essais Inter laboratoires, nous avons constaté que pour une même configuration d'impact normative, des valeurs de HIC (et autre critères) peuvent être très différents entre laboratoires ou entre essais au sein du même laboratoire, ce qui confirme encore une fois des conditions d'essai mal maîtrisées sont sensibles sur les conditions d'impact et ensuite des conséquences sur la performance d'écrans motards.

Un dispositif de retenue de véhicule CE (crash testé selon la norme EN1317-1&2) ne l'est plus lorsqu'il est muni d'un écran de protection motards (il s'agit alors d'un dispositif différent) à moins de subir, en plus des deux essais motards, deux nouveaux essais de choc véhicules. La multiplicité de ces essais, leurs incertitudes et leurs couts limitent très fortement le développement de solution innovantes.

L'introduction d'une évaluation numérique robuste permettrait de favoriser le développement des dispositifs de protection innovants en limitant les coûts de développement.

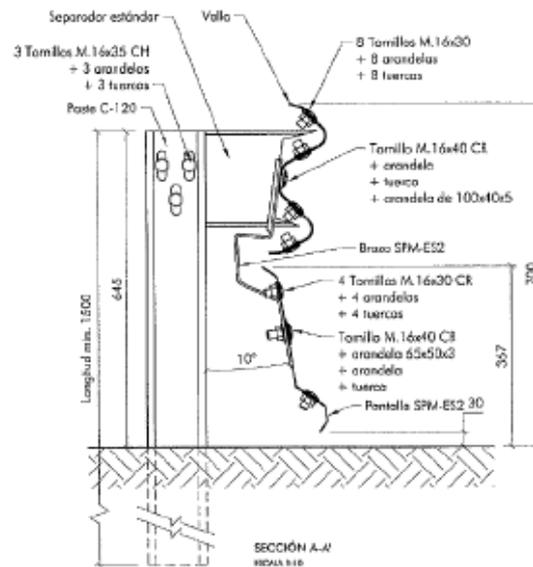
5 Références

- [1] C. Goubel, « Vehicle restraint system crash test modelling – Application to steel-wood structures », phdthesis, UNIVERSITE DE LYON, 2012. Consulté le: sept. 27, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00990871>
- [2] V. Kodjo, « Evaluation et modélisation des dispositifs de retenue pour motards », Rapport de thèse, Université Claude Bernard Lyon 1, Lyon, 2016.
- [3] G. Qian, « Sensitivity and robustness in industrial engineering : methodologies and applications to crash tests », Université de Lyon1, 2017.
- [4] « Bilan de l'accidentalité de l'année 2016 », L'Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière, France, Annual report, 2016.
- [5] D. Wu, « Quantification des causes des accidents de deux/trois-roues motorisés et de leurs conséquences corporelles », Université de Lyon1, Lyon, 2018.
- [6] S. Peldschus, E. Schuller, J. Koenig, M. Gaertner, D. G. Ruiz, et A. Mansilla, « Technical Bases for the Development of a Test Standard for Impacts of Powered Two-Wheelers on Roadside Barriers », Germany, 2007, vol. 13, p. 07-0332. Consulté le: févr. 14, 2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://trid.trb.org/view/1367069>
- [7] « Glissières métallique et sécurité des motocyclistes », SETRA (Service d'Etudes technique des Routes et Autoroutes), Note d'information, Circulation Sécurité Equipement Exploitation 118, nov. 1999.
- [8] P. Van Elslande, C. Perrin, T. Hermitte, Y. Page, et R. Engel, « Accidentologie, usage et représentations des deux-roues motorisés: Rapport de synthèse final du projet "2RM". 2ème partie : Présentation des travaux », 2008. Consulté le: déc. 07, 2018. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00544832>
- [9] J. M. Gambard et G. Louah, « Vitesses pratiquées et géométrie de la route », SETRA (Service d'Etudes technique des Routes et Autoroutes), juin 1986. Consulté le: janv. 07, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://trid.trb.org/view/1027191>
- [10] J.-E. Michel, T. Brenac, J. Magnin, C. Naude, et C. Perrin, « Les pertes de contrôle en courbe », IFSTTAR - Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux, Marne la Vallée, Rapport INRETS 262, janv. 2015.
- [11] « Ducati 748/996 Ower's manual », 1999.
- [12] G. Sequenzia, S. Oliveri, G. Fatuzzo, et M. Cali, « An advanced multibody model for evaluating rider's influence on motorcycle dynamics », *Proc. Inst. Mech. Eng. Part K J. Multi-Body Dyn.*, vol. 229, p. 193-207, juin 2014, doi: 10.1177/1464419314557686.

- [13] V. Cossalter, A. Doria, et L. Mitolo, « Inertial and Modal Properties of Racing Motorcycles », présenté à SAE Motorsports Engineering Conference and Exhibition, déc. 2002. Consulté le: avr. 15, 2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://sci-hub.tw/10.4271/2002-01-3347>
- [14] J. J. Nieboer, J. Wisman, A. C. M. Versmissen, M. T. P. van Slagmaat, I. Kurawaki, et N. Ohara, « Motorcycle Crash Test Modelling », USA, 1993. doi: 10.4271/933133.
- [15] Y. Wang et M. Sakurai, « Development and Verification of a Computer Simulation Model of Motorcycle-to-Vehicle Collisions », SAE International, Warrendale, PA, SAE Technical Paper 1999-01-0719, mars 1999. doi: 10.4271/1999-01-0719.
- [16] S. Mukherjee, A. Chawla, D. Mohan, M. Singh, M. Sakurai, et Y. Tamura, « Motorcycle-car side impact simulation », *Proc IRCOBIsle Man UK*, 2001.
- [17] J. D. Lloyd, « Biomechanics of Solo Motorcycle Accidents », *J. Forensic Biomech.*, vol. 7, n° 1, p. 1-6, 2016, doi: 10.4172/2090-2697.1000125.
- [18] R. Capitani et S. S. Pellari, « Analysis of the behaviour of biker protection devices for roadside barriers », *Int. J. Crashworthiness*, vol. 17, n° 5, p. 461-478, oct. 2012, doi: 10.1080/13588265.2012.678108.
- [19] R. Miralbes, « Motorcyclist Protection Systems: Analysis of the Crash Test Tolerances of the European Technical Specification and the Spanish Standard », *Adv. Mech. Eng.*, vol. 7, n° 2, p. 682875, févr. 2015, doi: 10.1155/2014/682875.
- [20] B. Chinn *et al.*, « COST-327 Motorcycle Safety Helmets », European Commission and Directorate General for Energy and Transport, Final report of the Action, 2001.
- [21] D. G. Ruiz, B. P. Magallón, S. Peldschus, E. Schuller, A. M. Gallo, et S. Bidal, « Overview on the development of a test standard for the evaluation of motorcyclists' impacts on road infrastructure elements », *Int. J. Crashworthiness*, vol. 15, n° 1, p. 1-15, mars 2010, doi: 10.1080/13588260902956070.
- [22] K. Witz, D. E. Hinkle, W. Wiersma, et S. G. Jurs, « Applied Statistics for the Behavioral Sciences », *J. Educ. Stat.*, vol. 15, n° 1, p. 84, 1990, doi: 10.2307/1164825.
- [23] M. Mukaka, « A guide to appropriate use of Correlation coefficient in medical research », *Malawi Med. J. J. Med. Assoc. Malawi*, vol. 24, n° 3, p. 69-71, sept. 2012.
- [24] « TS 1317-8 Inter-Laboratory Testing », 2019.

TS 1317-8 Inter-Laboratory Testing

Code: _____ Version: 01 Date: Oct - 2019 Page 2 of 25



Test item detail

Test Matrix:

- 6 tests per lab => 3 post centred (TM.1.60) and 3 mid-span (TM.3.60)

Impact conditions:

- Impact speed: $60 \pm \frac{6}{0} \%$ Km/h
- Impact angle: $30 \pm 2^\circ$
- According to CEN/TS 1317-8: 2012

TS 1317-8 Inter-Laboratory Testing

Code: _____ | Version: 01 | Date: Oct - 2019 | Page 3 of 25

2. RESULTS

2.1. Test performance:

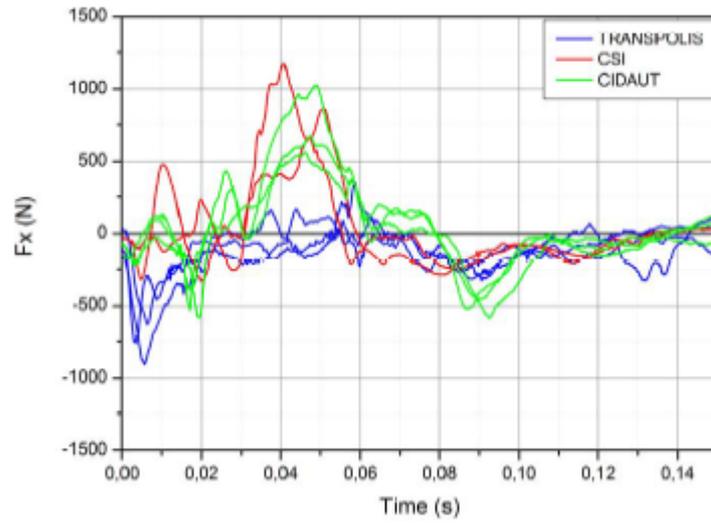
Lab	Test Type	Test Code	Speed	Angle
TRANSPOLIS	TM.1.60	TPSESM0051	61,9	30,1
		TPSESM0052	62,1	30,0
		TPSESM0053	62,4	30,8
	TM.3.60	TPSESM0054	63,0	30,9
		TPSESM0055	62,7	31,8
		TPSESM0056	63,0	31,6
CSI	TM.1.60	RR1	60,2	30
		RR2	61,1	30
	T.M.3.60	RR3	60,5	30
		RR4	60,5	30
CIDAUT	TM.1.60	E12-1467	61,2	30,6
		E12-1469	60,8	30,5
		E12-1562	60,7	30,0
	TM.3.60	E12-1497	60,9	29,5
		E12-1498	60,9	30,5
		E12-1649	62,5	29,9

2.2. Tests results:

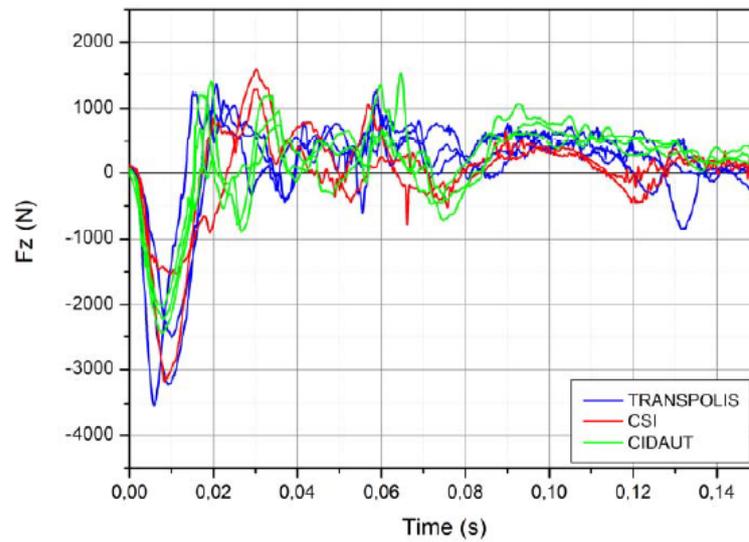
Lab	Test Type	Test Code	HIC36	Fx (Level)	Fz traction (Level)	Fz comp. (Level)	Mocx (Nm)	Mocy ext. (Nm)	Mocy flex. (Nm)
TRANSPOLIS	TM.1.60	TPSESM0051	254	I	I	I	68	42	40
		TPSESM0052	248	I	I	II	68	36	61
		TPSESM0053	472	I	I	II	68	42	43
	TM.3.60	TPSESM0054	326	I	I	II	73	53	69
		TPSESM0055	218	I	I	I	77	36	49
		TPSESM0056	217	I	I	I	85	37	31
CSI	TM.1.60	RR1	293	I	I	I	64	32	54
		RR2	122	I	I	I	59	47	73
	T.M.3.60	RR3	154	I	I	-	106	77	58
		RR4	191	I	I	I	75	62	41
CIDAUT	TM.1.60	E12-1467	143	I	I	I	59	40	41
		E12-1469	113	I	I	I	55	32	37
		E12-1562	101	I	I	I	60	40	67
	TM.3.60	E12-1497	195	I	I	I	60	31	22
		E12-1498	155	I	I	I	58	21	24
		E12-1649	129	I	I	I	70	35	43

2.3. Data comparison Test Type TM.1.60:

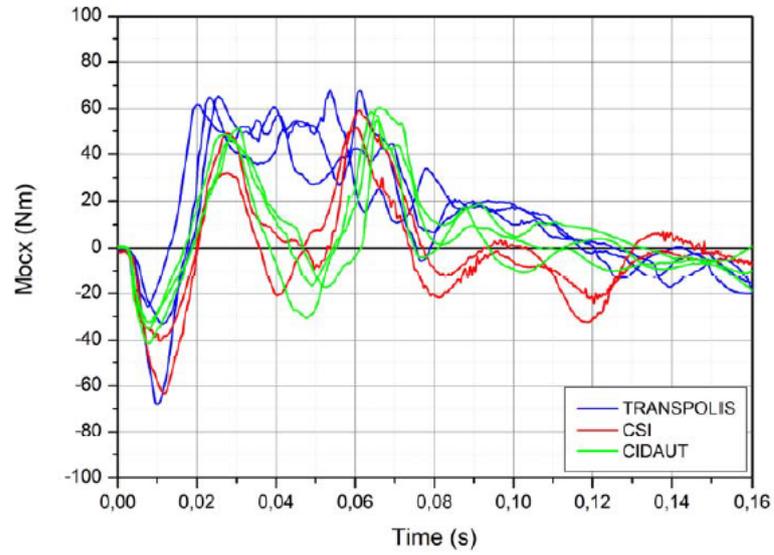
Anterior-posterior shear force (Fx)



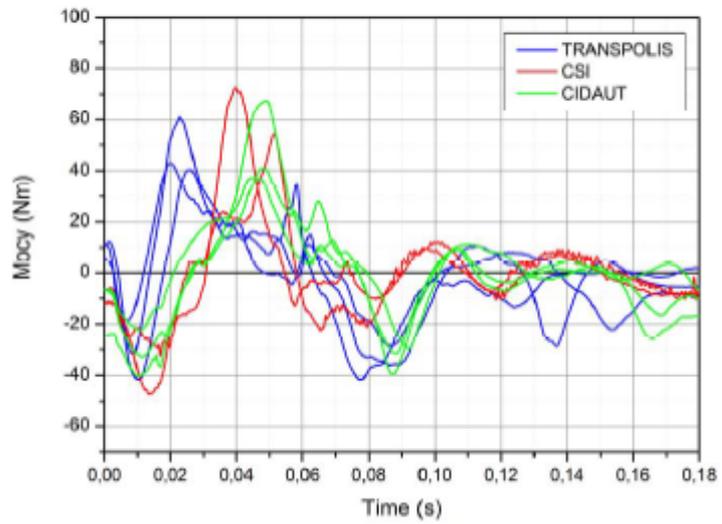
Tension-compression force (Fz)



Lateral bending moment calculated about the occipital condyle (M_{ocx})



Flexion/extension moment calculated about the occipital condyle (M_{ocy})



B. Annexe : Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour la validation du modèle de chute motard

Validation du modèle du motorcycle seul :

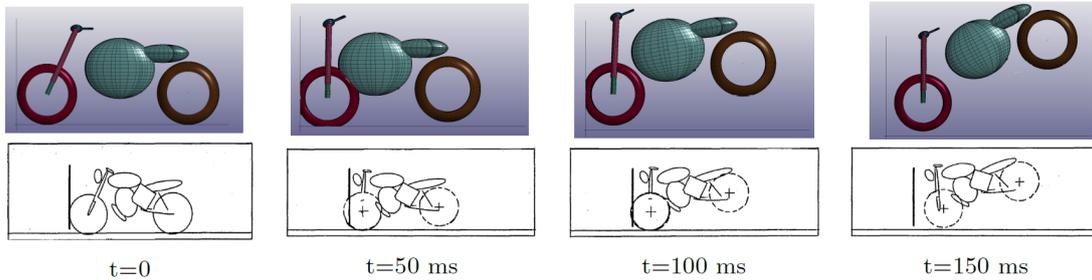


Figure 39 Expérimental (en bas) et numérique (en haut) cinématique du motorcycle impactant un mur rigide.

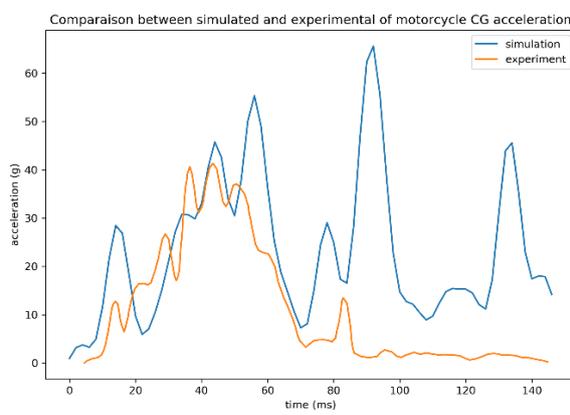


Figure 40 Accélération du CG du motorcycle

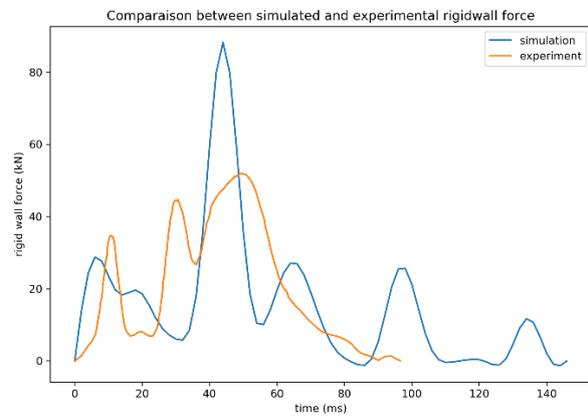
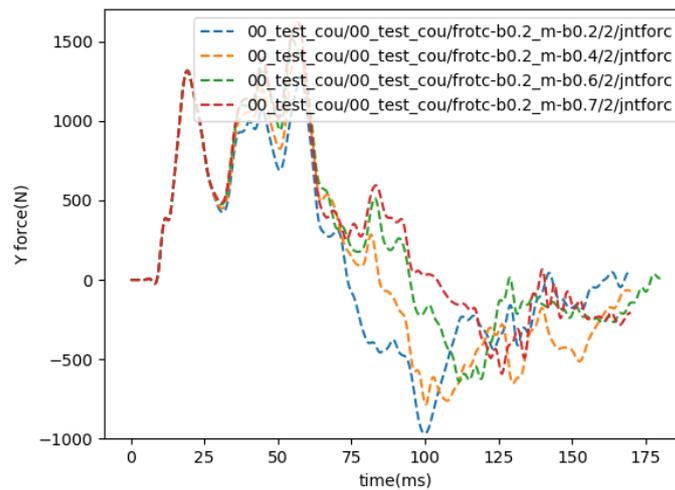
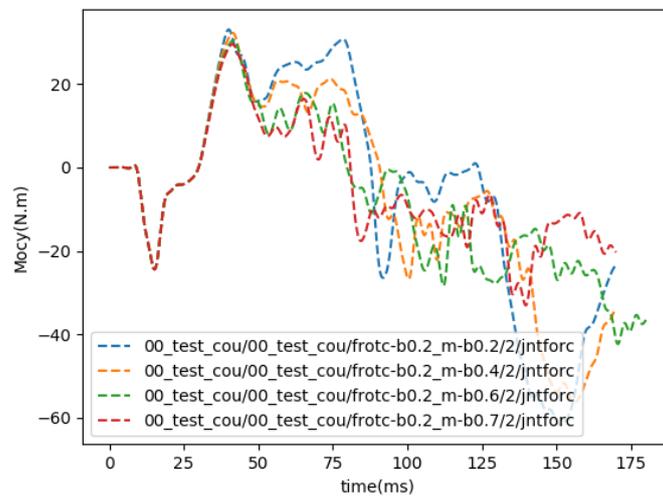
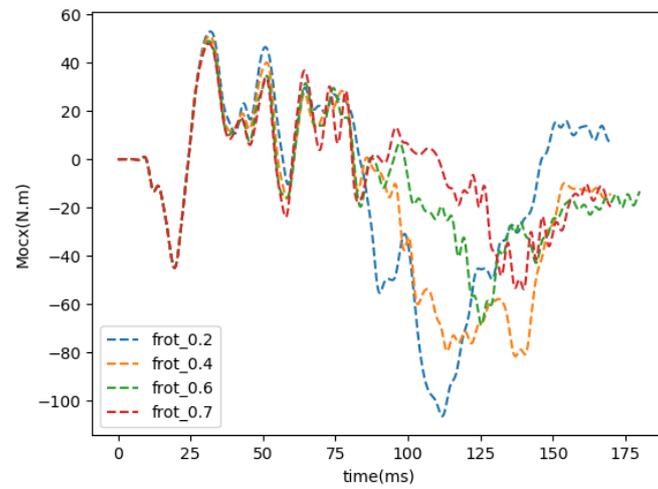


Figure 41 Force de contact du motorcycle

Validation du modèle de chute motard avec mannequin :



C. Annexe : Variation de critères de blessure pour l'influence de coefficient de frottement entre motard-barrière



D. Annexe : Graphes des critères de blessure pour validation du modèle d'impact motard

Les résultats d'essai concernant des efforts/moments au cou sont tracés en ligne pleine en différents couleurs qui correspondent à trois laboratoires différents. Le type d'essai TM1.60 a été fait 3 fois par le laboratoire Transpolis et CIDAUT et 2 fois par CSI. La ligne violette pointillée signifie le résultat de simulation de notre modèle.

Dans l'ensemble, les résultats de simulation sont bien corrélés avec les résultats expérimentaux bien que les moments sont moins corrélés après 100ms.

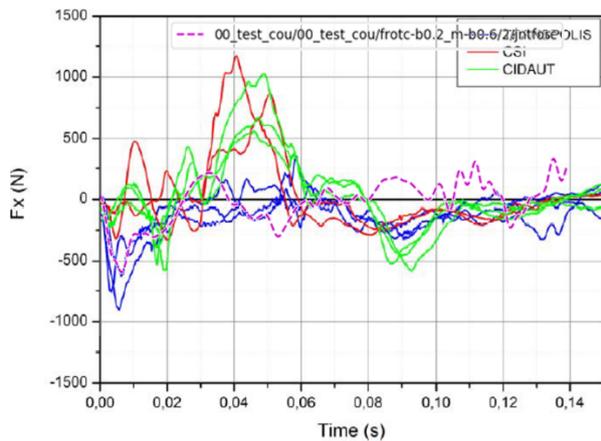


Figure 42 Force de cisaillement antéro-postérieur expérimentale et numérique

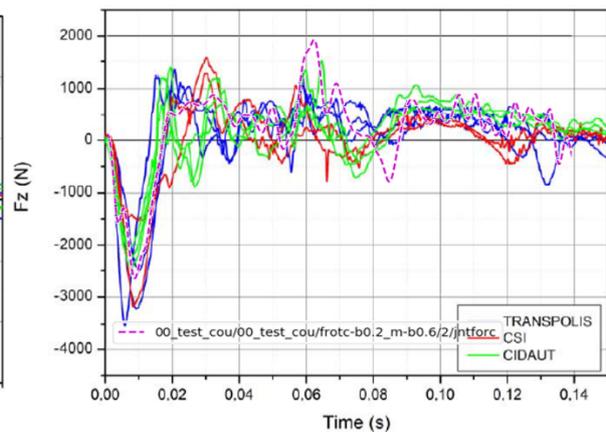


Figure 43 Force de traction-compression expérimentale et numérique

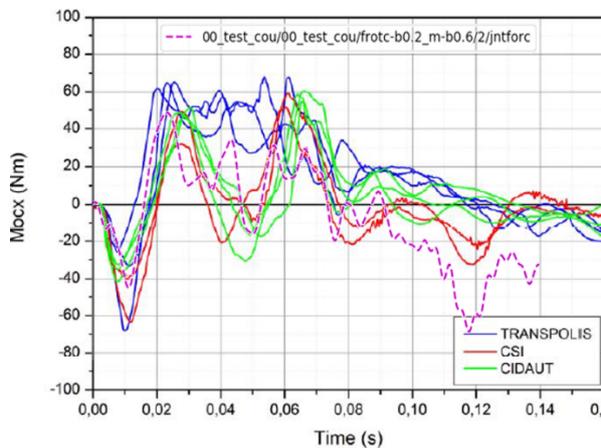


Figure 44 Moment de flexion latéral expérimental et numérique

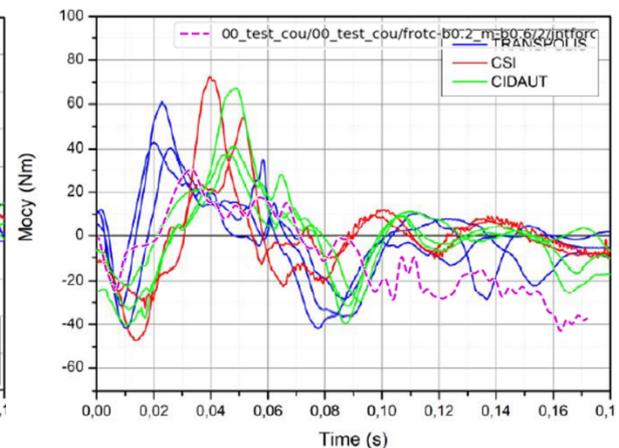


Figure 45 Moment de flexion/extension expérimental et numérique

E. Annexe : Effets principaux des conditions d'impact en petites variations

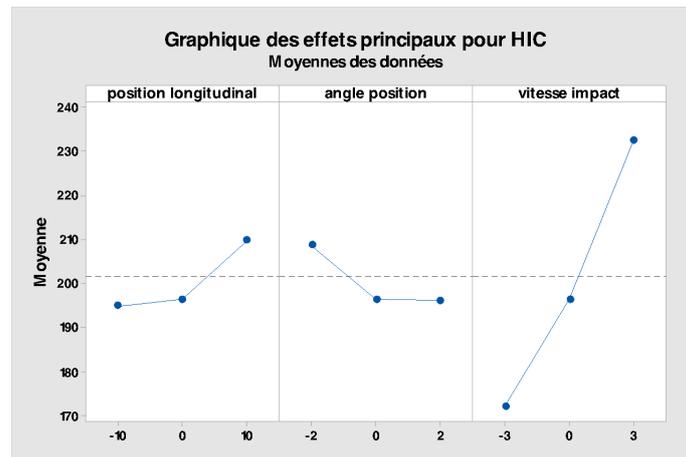
Résultats du 1^{er} plan d'expérience :

Des valeurs hors du niveau de sévérité I sont marquées en rouge.

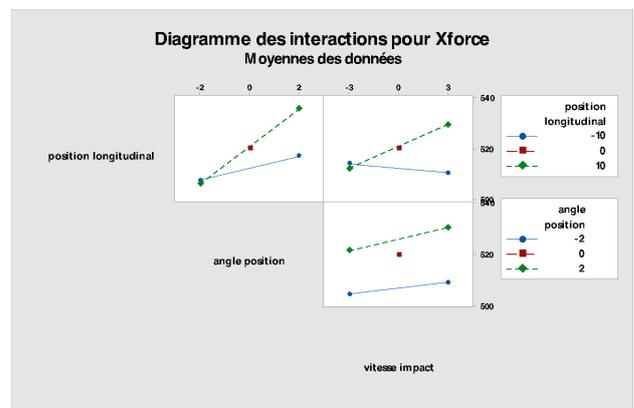
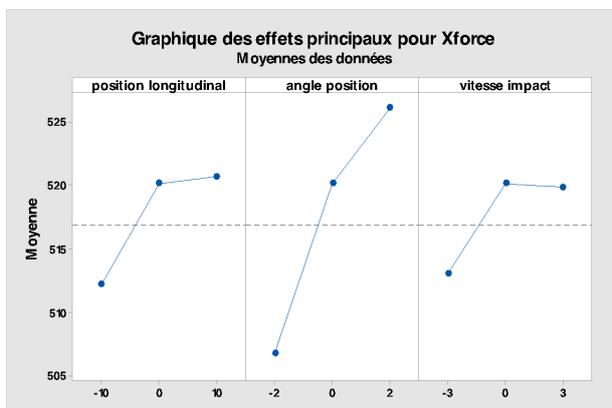
N° essai	Position longitudinal(cm)	Angle de position °	Vitesse d'impact (km/h)	HIC	Fx (N)	Fz traction(N)	Fz compression (N)	Mocx (Nm)	Mocy extension (Nm)	Mocy flexion (Nm)	A3ms (g)
1	-10	-2	-3	170	510	2182	407	47	18	39	32
2	-10	-2	0	194	507	2319	470	48	18	39	34
3	-10	-2	3	226	505	2626	554	49	18	37	38
4	-10	0	-3	170	509	2309	397	52	18	38	32
5	-10	0	0	196	523	2696	460	53	19	37	34
6	-10	0	3	224	528	2860	509	53	19	37	37
7	-10	2	-3	165	518	2511	492	51	19	41	30
8	-10	2	0	189	532	2712	532	52	19	41	33
9	-10	2	3	219	516	3003	589	52	19	41	35
10	0	-2	-3	173	490	2256	845	46	17	33	37
11	0	-2	0	206	503	2483	604	47	18	35	37
12	0	-2	3	237	522	2691	1227	50	18	35	41
13	0	0	-3	169	513	2241	595	51	19	39	34
14	0	0	0	196	520	2535	688	51	19	39	36
15	0	0	3	227	526	2884	842	51	19	39	37
16	0	2	-3	170	522	2510	559	52	19	42	32
17	0	2	0	191	539	2717	580	50	20	43	33
18	0	2	3	228	526	3055	705	51	19	43	37
19	10	-2	-3	184	499	2254	672	47	18	33	35
20	10	-2	0	219	518	2517	791	51	18	34	37
21	10	-2	3	255	514	2757	1219	57	18	36	36
22	10	0	-3	181	497	2402	553	51	19	40	33
23	10	0	0	205	529	2701	714	51	19	40	36
24	10	0	3	249	530	2994	1059	49	19	40	41
25	10	2	-3	170	526	2570	541	52	19	43	33
26	10	2	0	199	530	2861	583	49	19	42	36
27	10	2	3	230	545	2981	770	48	20	43	39

Tableau 10 Résultats du 1er plan d'expérience

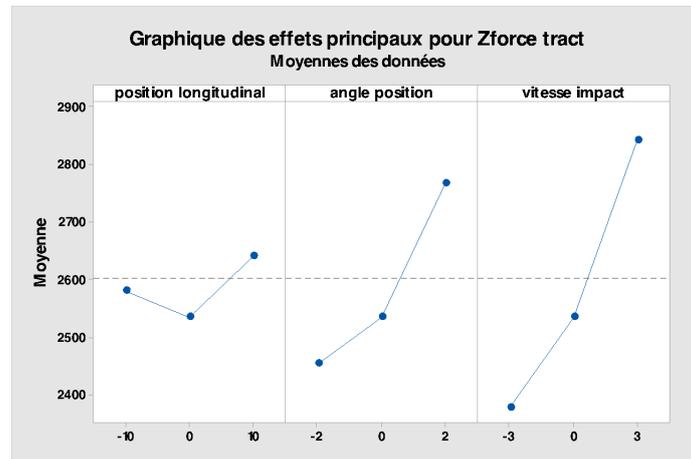
Pour HIC :



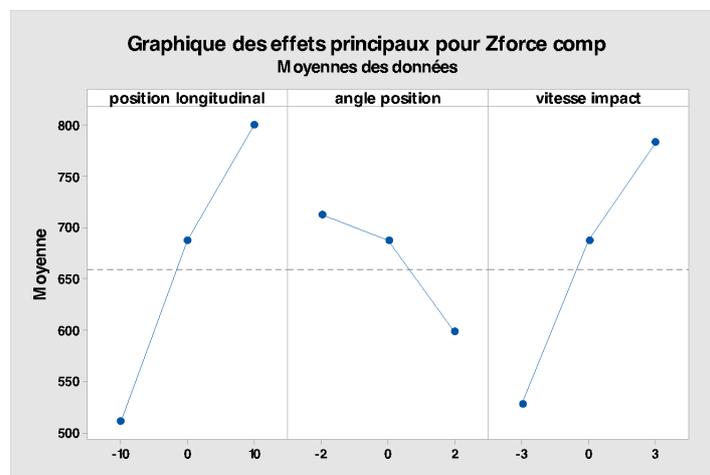
Pour Fx :



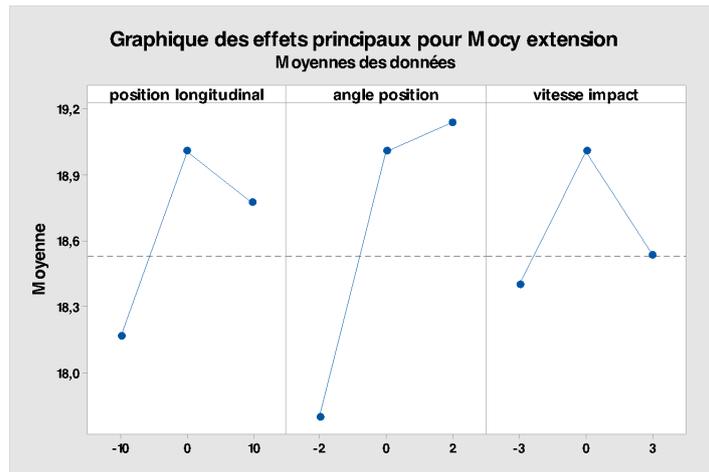
Pour Fz traction :



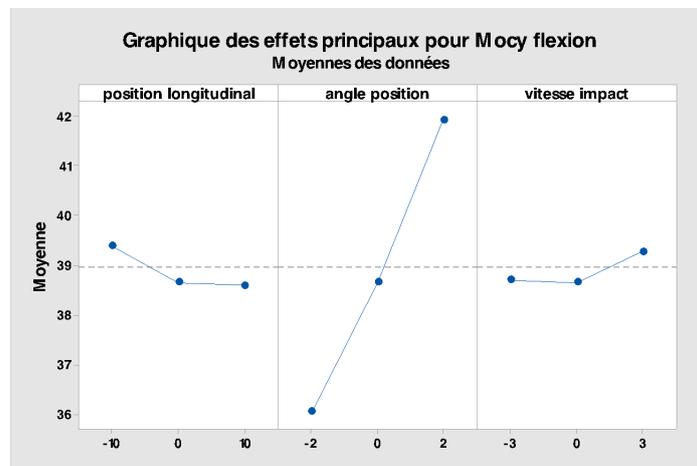
Pour Fz compression :



Pour Mocy extension :

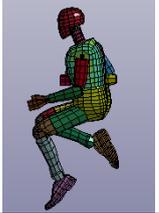
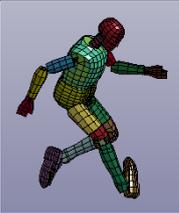
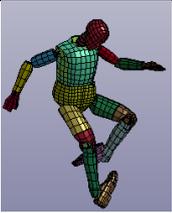
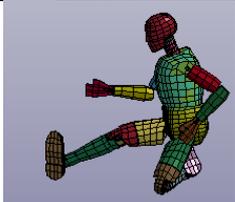


Pour Mocy flexion :

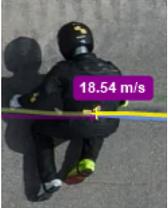
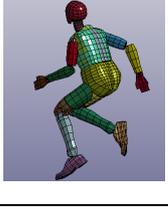
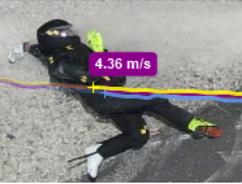
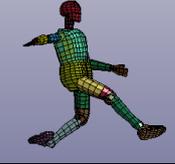


F. Annexe : Image de la cinématique pour la chute 40km/h et 60km/h

Pour la chute à 40km/h :

			
			
1	2	3	4
			
			
5	6	7	

Pour la chute à 60km/h :

			
			
1	2	3	4
			
			
5	6	7	8