



HAL
open science

Modélisation du comportement dynamique d'un deux-roues motorisé pour la reconstruction d'accidents et la détection d'incidents

Ecole Doctorale, Laura Costa

► To cite this version:

Ecole Doctorale, Laura Costa. Modélisation du comportement dynamique d'un deux-roues motorisé pour la reconstruction d'accidents et la détection d'incidents. Automatique / Robotique. AMU, 2017. Français. NNT: . tel-01985476

HAL Id: tel-01985476

<https://hal.science/tel-01985476>

Submitted on 18 Jan 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



UNIVERSITE D'AIX-MARSEILLE

IFSTTAR

ECOLE DOCTORALE EN MATHEMATIQUES ET INFORMATIQUE

Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes

Laboratoire Mécanismes d'Accidents

Thèse présentée pour obtenir le grade universitaire de docteur

Discipline : automatique

Laura COSTA

**Modélisation du comportement dynamique d'un deux-roues
motorisé pour la reconstruction d'accidents et la détection
d'incidents**

**Modelling of the Powered Two-Wheelers dynamic behavior for accident reconstruction
and incident detection**

Soutenue le 29/11/2017 devant le jury :

Michel BASSET	Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs Sud Alsace	Rapporteur
Jorge AMBROSIO	Technical University of Lisbon	Rapporteur
Saïd MAMMAR	Université d'Evry Val d'Essonne	Examineur
Thierry SERRE	IFSTTAR LMA	Co-directeur de thèse
Nacer M'SIRDI	Aix Marseille Université LSIS	Directeur de thèse
Bruno CARANTA	Provence Expertise	Invité
Christophe PERRIN	IFSTTAR LMA	Invité

Sommaire

Sommaire.....	III
Figures	VIII
Tableaux	XI
Introduction	1
Chapitre 1 Etat de l'art.....	4
I. Accidentologie. Qu'est-ce qu'un accident ?.....	4
II. Choix de modélisation et modèles existants	5
1. Modélisation multicorps.....	6
a. Les systèmes multicorps.....	7
b. Les corps.....	8
c. Les liaisons.....	8
d. Les principales approches topologiques	10
e. Comment générer un modèle ?	11
2. Modèles existants	16
III. Etude de la dynamique du deux-roues motorisé.....	20
1. Géométrie d'un deux-roues motorisé	22
a. L'angle de chasse.....	22
b. L'empattement.....	22
c. La position du centre de gravité.....	22
d. Effet gyroscopique.....	23
e. Equilibre d'un deux-roues motorisé.....	24
2. Modélisation des efforts pneumatiques	26
a. Grandeurs physiques conditionnant les efforts	27
b. Modèle linéaire de pneumatique.....	31
c. Modèle de Pacejka	31
3. Modélisation des suspensions.....	31
a. Définition et histoire	31
b. Modèle théorique de suspensions	33

IV. Conclusion	34
Chapitre 2 Modélisation du deux-roues motorisé pour la reconstruction d'accident	36
I. Evaluation du besoin. Cahier des charges fonctionnel.	36
1. La bête à cornes. Enoncé du besoin.	37
2. Expression fonctionnelle du besoin.	37
3. Le cahier des charges fonctionnel	39
II. Modèle multicorps développé.	40
1. Vue générale du modèle	40
2. Modèle de suspensions.....	42
3. Modèle de pneumatiques	43
4. Paramétrage du modèle	43
a. Géométrie.....	43
b. Masses et inerties.....	46
5. Synthèse du modèle.....	48
III. Implémentation du modèle	49
1. Utilisation de Matlab/Simulink/SimMechanics pour le développement du modèle. .	49
2. Gestion des entrées du modèle.....	54
IV. Conclusion	56
Chapitre 3 Validation du modèle Identification des paramètres dynamiques d'un deux-roues motorisé pour les manœuvres d'urgences.....	57
I. Méthodologie pour la validation.	57
II. Présentation de la moto instrumentée.....	58
1. Mesure de l'angle d'inclinaison.....	60
2. Evaluation de la vitesse.....	61
3. Détection du freinage et de son intensité.....	61
4. Estimation des vitesses de roulis, lacet, tangage et des accélérations.	63
5. Quantification du débattement de suspension	63
6. Evaluation de l'ouverture des gaz.....	64
7. Élément de contexte.....	64

8.	Estimation de la trajectoire	64
9.	Evaluation de l'angle guidon et du couple de direction	64
III.	Présentation de la campagne d'essais	66
1.	Essais sur piste	66
a.	Manœuvre de slalom	66
b.	Manœuvre d'évitement	68
c.	Essais de freinage	69
d.	Essais de roulage	70
2.	Essais sur route ouverte.....	71
IV.	Validation du modèle.....	72
1.	Validation sur un virage sur route ouverte	73
2.	Validation sur des manœuvres longitudinales	76
a.	Gestion de la vitesse.....	77
b.	Gestion des blocages de roues.....	80
3.	Validation sur des manœuvres transversales	83
a.	Manœuvre de slalom	84
b.	Manœuvre d'évitement	88
V.	Détection d'un incident.....	92
VI.	Conclusion	100
Chapitre 4 Méthodologie de reconstruction d'accidents.....		104
I.	Présentation des EDA et méthodologie pour le recueil.	104
II.	Méthodologie pour la reconstruction d'accident.	109
1.	Analyse de l'accident.....	111
2.	Passage sur les lieux de l'accident.....	111
3.	Validation des signaux acquis	111
4.	Modulation des paramètres d'entrée du modèle.....	112
a.	Méthode pour la perte de contrôle.	112
b.	Méthode pour le freinage d'urgence	112
5.	Analyse des résultats de simulation	112
a.	Méthode pour la perte de contrôle.	112

b.	Méthode pour le freinage d'urgence	113
III.	Cas n°1 : perte de contrôle en courbe	114
1.	Présentation du cas.....	114
2.	Analyse de l'accident.....	118
3.	Passage sur les lieux de l'accident.....	118
4.	Validation des signaux acquis	119
5.	Modulation des paramètres d'entrée du modèle.....	121
a.	Configuration n°1	121
b.	.Configuration n°2	125
c.	Configuration n°3	126
d.	Configuration n°4	128
6.	Conclusion	130
7.	Observations dynamique.....	132
IV.	Cas n°2 : Perte de contrôle en courbe suite à freinage d'urgence.	137
1.	Présentation du cas.....	137
2.	Analyse de l'accident.....	138
3.	Passage sur les lieux de l'accident.....	141
4.	Validation des signaux acquis	141
5.	Modulation des paramètres d'entrée du modèle.....	143
a.	Configuration n°1	143
b.	Configuration n°2	146
c.	Configuration n°3	148
6.	Analyse des résultats de simulation	149
7.	Observations dynamiques	151
8.	Détection de la chute.....	158
	Conclusion & perspectives	160
	Annexe 1	164
	Calcul de la force longitudinale (sans dérive)	164
	Calcul de la force longitudinale (avec dérive)	165

Calcul de la force latérale (sans dérive)	165
Calcul de la force latérale (avec dérive)	166
Calcul du moment d'alignement (sans dérive).....	166
Calcul du moment d'alignement (avec dérive).....	168
Annexe 2	169
Annexe 3	171
Annexe 4	173
Bibliographie	211

Figures

Figure 1 Schéma de principe de la modélisation multicorps [7].....	7
Figure 2 Topologie d'un système.....	8
Figure 3 Les différentes approches topologiques [7].....	10
Figure 4 Comparaison des approches symbolique et numérique.....	15
Figure 5 Architecture du modèle de Salim Maakaroun.....	17
Figure 6 Architecture du modèle de Cossalter, Lot et Massaro.....	19
Figure 7 Architecture du modèle de Sharp.....	20
Figure 8 Limites des angles de glissement latéral et de roulis pour les véhicules à deux et quatre roues [23].....	21
Figure 9 Définition des rotations remarquables.....	21
Figure 10 Géométrie d'une moto.....	23
Figure 11 Effet gyroscopique de la roue.....	24
Figure 12 Bilan des forces en ligne droite.....	25
Figure 13 Bilan des forces en virage.....	26
Figure 14 Forces et moments agissant au point de contact pneu/chaussée [23].....	27
Figure 15 Paramétrage géométrique du centre de gravité.....	30
Figure 16 Fourche télescopique (a), double amortisseur (b), mono amortisseur (c).....	32
Figure 17 La bête à cornes.....	37
Figure 18 Le produit dans son environnement.....	38
Figure 19 Diagramme pieuvre.....	38
Figure 20 Architecture du modèle.....	42
Figure 21 Paramétrage géométrique du modèle.....	44
Figure 22 Méthode de la mesure de la position longitudinale du centre de gravité de la moto.....	45
Figure 23 Méthode de mesure de la position verticale du centre de gravité de la moto.....	45
Figure 24 Schéma cinématique du modèle de deux-roues motorisé.....	48
Figure 25 Modèle de pneumatique.....	50
Figure 26 Modèle implémenté dans Matlab/Simulink/SimMechanics.....	52
Figure 27 Positionnement des repères.....	54
Figure 28 Régulation de vitesse.....	55
Figure 29 Vue d'ensemble des différents capteurs qui équipent la moto.....	59
Figure 30 Schéma d'installation des télémètres lasers (a) et méthode de calcul de l'angle d'inclinaison (b).....	61
Figure 31 Fonctionnement du Dual CBS en actionnant le frein avant (a) et le frein arrière (b).....	62
Figure 32 EMMA 3 (a) et enregistreur installé sur la moto (b).....	63
Figure 33 Plan de montage du couplemètre (a) et installation sur la moto (b).....	65
Figure 34 Fin de la séquence de slalom à gauche.....	67

<i>Figure 35 Slalom avec une entrée à gauche</i>	67
<i>Figure 36 Séquence d'évitement à droite</i>	68
<i>Figure 37 Evitement à droite</i>	68
<i>Figure 38 Séquence de freinage</i>	69
<i>Figure 39 Essais de freinage</i>	70
<i>Figure 40 Tracé du circuit d'Eyguières</i>	70
<i>Figure 41 Essais de roulage</i>	71
<i>Figure 42 Trace GPS de quelques essais sur route</i>	72
<i>Figure 43 Signaux d'entrée, couple (a) et vitesse (b), pour la validation sur un virage simple</i>	74
<i>Figure 44 Trajectoire (a) et angle de roulis (b) acquis et simulé pour la validation dans un virage simple</i>	75
<i>Figure 45 Variations de k en fonction de la variation de vitesse</i>	78
<i>Figure 46 Comparaison de la vitesse acquise et simulée à 30 km/h (a) et 90 km/h (b)</i>	79
<i>Figure 47 Blocage de roue à 30 et 90 km/h</i>	82
<i>Figure 48 Variations de la pression dans le circuit de freinage à 30 km/h (a) et 90 km/h (b)</i>	83
<i>Figure 49 Inputs de couple (a) et de vitesse (b) pour un slalom à 30 km/h et à Vmax</i>	85
<i>Figure 50 Comparaison des résultats issus de la simulation et de l'acquisition d'un slalom pour la trajectoire (a), l'angle de roulis (b) et l'angle guidon (c)</i>	87
<i>Figure 51 Inputs de couple (a) et de vitesse (b) pour un évitement à 30 km/h et Vmax</i>	89
<i>Figure 52 Comparaison des résultats issus de la simulation et de l'acquisition d'un évitement pour la trajectoire (a), l'angle de roulis (b) et l'angle guidon (c)</i>	91
<i>Figure 53 Seuils de détection d'un incident pour un slalom</i>	96
<i>Figure 54 Seuils de détection d'un incident pour un évitement</i>	97
<i>Figure 55 Seuils de détection d'un incident pour du roulage sur circuit</i>	98
<i>Figure 56 Seuils de détection d'un incident pour du roulage sur route</i>	99
<i>Figure 57 Angle de roulis (a), angle guidon (b) et variation du temps en fonction du nombre de point pour un slalom à 30 km/h simulé avec différents pas de temps</i>	102
<i>Figure 58 Méthodologie pour les EDA</i>	108
<i>Figure 59 Méthodologie pour la reconstruction d'accidents</i>	110
<i>Figure 60 Plan du cas d'accident n°1</i>	115
<i>Figure 61 Photos du cas d'accident n°1</i>	117
<i>Figure 62 Différentes trajectoire acquises pour l'accident n°1</i>	119
<i>Figure 63 Input de couple (a) et de vitesse (b)</i>	120
<i>Figure 64 Angle de roulis et trajectoire simulés sans modifications des inputs</i>	121
<i>Figure 65 Minimisation de la fonction d'évaluation (a) et trajectoires simulées(b) pour la Configuration n°1 du cas d'accident n°1</i>	122
<i>Figure 66 Matrice des résultats de la Configuration n°1 pour le cas d'accident n°1</i>	123

<i>Figure 67 Minimisation de la fonction d'évaluation (a) et trajectoires simulées (b) pour la Configuration n°2 du cas d'accident n°1</i>	125
<i>Figure 68 Minimisation de la fonction d'évaluation (a) et trajectoires simulées (b) pour la Configuration n°3 du cas d'accident n°1</i>	127
<i>Figure 69 Simulation n°16 (a) et n°21 (b) de la Configuration n°3 du cas d'accident n°1</i>	128
<i>Figure 70 Minimisation de la fonction d'évaluation (a) et trajectoires simulées (b) pour la Configuration n°4 du cas d'accident n°1</i>	129
<i>Figure 71 Matrice des résultats de la Configuration n°4 du cas d'accident n°1</i>	131
<i>Figure 72 Répartition des points GPS pour l'étude de la dynamique de l'accident n°1</i>	132
<i>Figure 73 Entrées de vitesse (a) et de couple (b) originales et modulées</i>	133
<i>Figure 74 Angle de roulis (a), forces (b) et moments (c) pneumatiques relatifs à la simulation de l'accident n°1</i>	135
<i>Figure 75 Visibilité de la voiture (a) et de la moto (b) en approche du lieu de l'accident</i>	138
<i>Figure 76 Positions finales des véhicules sur la chaussée (marquage au sol en rouge)</i>	139
<i>Figure 77 Plan de l'accident n°2</i>	140
<i>Figure 78 Traces sur la chaussée</i>	141
<i>Figure 79 Input de couple (a) et de vitesse (b)</i>	142
<i>Figure 80 Trajectoire simulés sans modification des inputs</i>	143
<i>Figure 81 Minimisation de la fonction d'évaluation (a) et ensemble des trajectoires simulées (b) pour la Configuration n°1 du cas d'accident n°2</i>	144
<i>Figure 82 Tableau des résultats de la Configuration n°1 du cas d'accident n°2</i>	146
<i>Figure 83 Représentation spatio-temporelle de la Configuration n°2 du cas d'accident n°2</i>	147
<i>Figure 84 Ensemble des trajectoires simulées pour la Configuration n°3 du cas d'accident n°2</i>	148
<i>Figure 85 Tableau des résultats de la configuration n°3 du cas d'accident n°2</i>	149
<i>Figure 86 Trajectoires des deux solutions possibles pour l'accident n°2</i>	150
<i>Figure 87 Animation du cas d'accident n°2, point de vue conducteur de la moto</i>	152
<i>Figure 88 Repérage des points GPS pour l'étude de la dynamique de l'accident n°2</i>	153
<i>Figure 89 Entrées de vitesse (a) et de couple (b) originales et modulées</i>	154
<i>Figure 90 Vitesse de la roue avant (a), angle de roulis (b), angle de dérive (c), forces (d) et moments (e) pneumatiques</i>	158
<i>Figure 91 Efforts pneumatique pour la détection de chute</i>	159
<i>Figure 92 Détermination de l'inertie</i>	169
<i>Figure 93 Matrice des résultats de la Configuration n°2 du cas d'accident n°1</i>	171
<i>Figure 94 Matrice des résultats de la Configuration n°3 du cas d'accident n°1</i>	172

Tableaux

<i>Tableau 1 Cahier des charges fonctionnel.....</i>	<i>39</i>
<i>Tableau 2 Coefficient de raideur et d'amortissement pour les suspensions avant et arrière</i>	<i>43</i>
<i>Tableau 3 Paramètres géométriques de la Honda VFR 800.....</i>	<i>46</i>
<i>Tableau 4 Masses et inerties des différents corps pour la Honda VFR 800 et l'Aprilia RSV 1000</i>	<i>48</i>
<i>Tableau 5 Paramétrage du modèle.....</i>	<i>53</i>
<i>Tableau 6 Récapitulatif des besoins pour la validation du modèle</i>	<i>58</i>
<i>Tableau 7 Données acquises avec la moto instrumentée</i>	<i>60</i>
<i>Tableau 8 Récapitulatif des essais réalisés sur piste</i>	<i>71</i>
<i>Tableau 9 Répartition des points de repère pour la validation du modèle sur un virage simple</i>	<i>73</i>
<i>Tableau 10 Paramètres dynamiques relevés lors de la validation dans un virage simple</i>	<i>76</i>
<i>Tableau 11 Accélérations associées au coefficient k.....</i>	<i>77</i>
<i>Tableau 12 Récapitulatif des distances d'arrêt</i>	<i>80</i>
<i>Tableau 13 Valeurs maximales de l'accélération longitudinale, de la vitesse de roulis et de l'accélération de roulis pour des manœuvres de slalom, évitement et tour de circuit à différentes vitesses.....</i>	<i>93</i>
<i>Tableau 14 Répartition des points pour l'étude de la dynamique du cas d'accident n°1</i>	<i>133</i>
<i>Tableau 15 Répartition des points pour l'étude de la dynamique du cas d'accident n°2.....</i>	<i>153</i>

Introduction

En 2015, la circulation des motocyclettes sur le territoire français était estimée à 8.4 milliards de kilomètres parcourus, soit 1.5% du trafic motorisé alors que les motocyclistes représentent 18% des personnes tuées [1]. Le risque d'être tué ramené aux kilomètres parcourus pour un conducteur de moto de plus de 125 cm³ est 27 fois plus élevé que pour un conducteur de véhicule de tourisme. Au vu de ces chiffres, la population motocycliste est fortement représentée dans les accidents mortels. 81% des tués possédaient une moto de plus de 125 cm³ et de par leur potentiel de vitesse élevée et leur manque de protection, ce type de véhicule rend les usagers vulnérables. En France en 2015, 35% des motocyclistes tués le sont sans implication d'un tiers. 58% des tués le sont sur route hors agglomération et dans 45% des cas en courbe. Ainsi, le rôle du comportement dynamique propre à ce type de véhicule peut poser question dans la génération de l'accident.

Le taux de mortalité et d'accidentologie peut alors être en partie expliqué par les problèmes liés à la dynamique du véhicule spécifique aux deux-roues motorisés (2RM). D'où la décision d'aborder cette problématique et d'étudier la dynamique de cette catégorie de véhicule au travers de cette thèse. Une meilleure connaissance du comportement d'un deux-roues motorisé permettra de réaliser des reconstructions d'accidents plus fidèles à la réalité, de mieux comprendre et expliquer le déroulement de ce type d'accident et de participer ainsi à l'amélioration de la sécurité des 2RM. Ces travaux sont menés en collaboration entre le Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes (LSIS Aix-Marseille Université) à Marseille et l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR) à Salon de Provence. Cette thèse est cofinancée par la région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) ce qui implique l'investissement d'un partenaire socio-économique dans les travaux de recherche. Notre choix s'est porté sur la société Provence Expertise, basée à Salon de Provence. Ce cabinet, représenté par Monsieur Bruno CARANTA, est spécialisé dans l'expertise en accidentologie auto/moto. L'expérience de ce dernier et l'expertise de l'IFSTTAR, notamment du Laboratoire Mécanismes d'Accidents (LMA), ont permis de recentrer la problématique autour de la phase dite de pré choc.

La reconstruction d'accident est un enjeu majeur tant pour la recherche et l'amélioration des systèmes de sécurité que pour les experts en accidentologie. C'est un travail délicat au cours duquel il est important d'analyser ce qu'il s'est passé au cours des différentes étapes de l'accident. Ce dernier se décompose en plusieurs phases : la post-collision, la collision et la pré collision. Ces phases de l'accident ne sont pas traitées dans l'ordre chronologique mais en remontant dans le temps, ainsi au fil des étapes de l'accident, les incertitudes augmentent et la phase de pré collision devient très vite difficile à identifier. L'INRETS puis l'IFSTTAR, ont mis au point il y a plusieurs années des méthodes de reconstruction d'accidents basées sur le recueil d'informations en temps réel sur les accidents de la route afin de mieux les comprendre [2]. Ces méthodes ont fait leurs preuves en ce qui concerne les véhicules à 4 roues. Une étude basée sur le principe de conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie cinétique est menée afin de déterminer la vitesse au moment de l'impact puis une analyse cinématique permet d'estimer la vitesse initiale en situation de conduite. En revanche, en ce qui concerne le 2RM, l'étude cinématique est rarement suffisante pour traiter la phase de pré collision. Aussi, dans ces travaux, un modèle de simulation du comportement dynamique de moto prenant en compte les spécificités de la dynamique propre à ce type de véhicule est développé. Ce modèle permettra de comprendre et d'expliquer quels paramètres de commande effectués par le conducteur, quels paramètres liés aux caractéristiques de l'infrastructure ou du véhicule sont intervenus au cours de la phase de pré collision et qui a mené à l'accident. Ce modèle est un réel avantage lorsqu'il s'agit de réaliser une reconstruction d'accident, d'autant plus qu'il n'existe aucun outil à ce jour dédié à cet exercice. En ce qui concerne le traitement de la collision et de la post collision les méthodes mise en place pour le 4 roues restent valables et sont donc conservées. Les travaux de cette thèse portent uniquement sur l'analyse de la pré collision et le choc ne sera donc pas considéré afin de se focaliser sur les situations de conduite à la limite de la maîtrise par le conducteur. A l'issue de ce travail, l'objectif est de disposer d'un outil permettant de traiter avec plus de fiabilité la phase de pré collision qui joue un rôle majeur dans la reconstruction de l'accident.

La problématique de ce travail est de mettre en place une méthodologie qui permettra de traiter cette phase de l'accident. Avant de vouloir étudier la pré collision à proprement parler, il est nécessaire de développer un modèle qui prend en compte les spécificités dynamiques d'une moto. Ce modèle devra avoir une réponse aux sollicitations imposées aussi bien dans le cadre d'une conduite normale qu'en situation d'urgence. En effet, le modèle doit être capable de simuler une situation accidentogène où de fortes sollicitations dynamiques sont appliquées au véhicule. Des essais expérimentaux à l'aide d'une moto instrumentée seront

menés sur piste afin de valider le modèle. Une fois ce modèle répondant aux exigences de la reconstruction d'accidents développé, l'analyse de la phase de pré collision peut être faite. L'étude de cette phase nécessite un travail expérimental de recueil des paramètres dynamiques à l'aide d'une moto instrumentée sur les lieux de l'accident. Une fois ces données collectées et analysées, elles seront extrapolées pour correspondre au mieux à la situation d'urgence présumée de l'accident réel et l'analyse numérique à l'aide du modèle pourra être réalisée.

Ce manuscrit s'articule autour de quatre chapitres. Le premier recensera l'état de l'art. Un premier paragraphe sera consacré à l'accidentologie et aux méthodes de reconstruction d'un accident. Un second traitera des différents modèles de moto existants dans la littérature et des méthodes de modélisation. Une troisième partie sera consacrée à la dynamique du véhicule et aux différents organes qui composent une moto (pneumatique, suspension, frein, ...); il est indispensable d'avoir une bonne connaissance sur ces derniers afin de pouvoir les assembler pour modéliser un 2 roues motorisé.

Le chapitre 2 traitera de l'étude de la modélisation du 2RM pour la reconstruction d'accident. Premièrement, un cahier des charges sera établi afin de déterminer les besoins et faire les choix de modélisation appropriés tant en terme de complexité du modèle qu'en terme de pilotage de ce dernier (choix des entrées). Une fois le cahier des charges établi, les choix de modélisation seront arrêtés et présentés. Une dernière partie présentera l'implémentation du modèle à l'aide du logiciel de simulation choisi.

Le chapitre 3 présentera la validation du modèle par comparaison avec des essais expérimentaux et l'identification des paramètres dynamiques d'un 2RM pour les manœuvres d'urgence. Une présentation de la moto instrumentée et des campagnes d'essais réalisées sera faite. Les résultats en termes de seuils dynamiques seront proposés. La validation du modèle que ce soit en sollicitations longitudinale ou en transversale sera exposée.

Le chapitre 4 clôturera ce manuscrit avec une présentation de la méthodologie de reconstruction d'accidents proposée. On y retrouvera un exposé de la méthodologie aussi bien expérimentale que numérique mais aussi une présentation de la solution qui minimise l'erreur entre la simulation et la réalité selon différents critères. Pour terminer, l'application du modèle à deux cas issus des Études Détaillées d'Accidents (EDA) réalisées par l'IFSTTAR LMA à Salon de Provence sera proposée.

Chapitre 1

Etat de l'art

“

L'état de l'art est l'état des connaissances dans tout domaine donné (scientifique, technique, artistique, médical, etc.) à un instant donné.

”

Dans ce chapitre, un état de l'art des domaines qui nous intéressent est réalisé ; à savoir, l'accidentologie mais aussi un 'inventaire' des différents modèles existants dans la littérature et les méthodes de modélisation utilisées. Pour terminer, les différents organes qui composent la moto et qui sont à prendre en considération pour la modélisation sont répertoriés et détaillés.

I. Accidentologie. Qu'est-ce qu'un accident ?

L'étude des accidents de la circulation routière repose sur la mise en œuvre de différentes méthodes d'analyse, en premier lieu l'exploitation statistique des fichiers constitués sur la base des données recueillies par les forces de l'ordre ou les compagnies d'assurance[3]. Elles permettent de rendre compte de l'importance du phénomène, de ses tendances générales et de leur évolution, d'évaluer des enjeux de sécurité, d'identifier des facteurs associés à l'occurrence des accidents [4]. Toutefois, certains besoins d'approfondissement de ces analyses, pour la reconstruction d'accidents notamment, se sont heurtés à un degré de finesse et à un niveau de détail insuffisant des données recueillies dans ces fichiers. Il faut alors se donner les moyens de collecter des données plus fines, plus précises et, quelquefois, plus fiables que celles rassemblées par les moyens habituels. C'est à cela que s'est attelé le LMA de l'IFSTTAR depuis plusieurs années [2]. Les méthodes se sont surtout inspirées de la démarche clinique empruntée au domaine médical. L'objectif principal est la compréhension du phénomène accident dans son origine et son déroulement et l'identification des dysfonctionnements du système usager-véhicule-environnement.

Dans les médias, l'accident se résume souvent en termes de conséquences et de bilans. Cependant, l'accident est une histoire, celle des interactions entre les trois composants du système usager-véhicule-environnement et de leur évolution. Cette histoire se déroule dans un espace spatio-temporel et se prête à une analyse étape par étape. Dans l'ordre

chronologique, ces étapes sont, la situation de conduite, la situation de rupture, la situation d'urgence, la situation de choc et la situation de post-choc. La situation de conduite plante le décor et les protagonistes. La situation de rupture confronte les acteurs à un problème à résoudre. La situation d'urgence est celle de la recherche hâtive d'une solution. La situation de choc conclut l'échec de la solution. La situation de post-choc est subie par les acteurs et s'arrête lorsque les véhicules atteignent leur position finale. C'est un processus défini par un enchaînement de faits qu'il faut situer dans le temps et l'espace (tel fait s'est passé à tel moment et à tel endroit), et par une logique causale qui relie ces faits entre eux (tel fait s'est produit parce que tel autre a eu lieu avant). Ce qui se passe à une étape du processus dépend de l'état du système à l'étape précédente. L'étude de ces phases se fait en remontant dans le temps à l'aide de différentes méthodes. Les phases de post choc et de post-choc peuvent être traitées de manière numérique ou expérimentale (crash-test). La phase de pré-choc qui regroupe la situation de conduite, de rupture et d'urgence est plus difficile à aborder. Des études basées sur le Naturalistic Driving Study ou des relevés sur le terrain permettent de traiter la situation de conduite et de rupture. En revanche il n'existe pas de méthode dédiée à analyser la situation d'urgence. Les travaux de cette thèse se situent au cours de la situation d'urgence. Un évènement imprévu a interrompu la situation de conduite en détruisant son équilibre (situation de rupture). Le but est de comprendre les actions qu'a pu mener le conducteur au cours de la situation d'urgence pour faire face à l'évènement « imprévu ». Ce qui caractérise la situation d'urgence par rapport à la situation de conduite est le niveau de sollicitation soudainement élevé imposé aux composants du système.

II. Choix de modélisation et modèles existants

La modélisation constitue l'une des activités majeures des ingénieurs et chercheurs. Conceptualiser les phénomènes physiques par l'intermédiaire d'un modèle permet de comprendre les liens entre les grandeurs physiques propres au système, de prévoir l'influence d'une entrée sur une sortie mais aussi de prédire le rôle d'une modification d'une partie du système et surtout d'effectuer des simulations. La modélisation constitue toujours une étape délicate, car le degré de finesse du modèle doit être adapté à l'usage auquel est destiné le modèle. De plus, le modèle reste une approximation d'une réalité physique souvent beaucoup plus complexe que les hypothèses qui ont été émises. Différentes méthodes existent pour la modélisation de systèmes complexes. Les plus répandues sont l'approche multicorps et éléments finis [5] [6]. Le multicorps permet d'étudier les

déformations, mouvements et interactions des corps les uns par rapport aux autres alors que la méthode des éléments finis permet d'étudier la déformation du corps. Au regard de nos besoins, l'approche multicorps semble être la plus adaptée. Cette méthodologie est largement utilisée dans les domaines de la robotique, de l'aérospatiale et de la dynamique du véhicule. Au cours de ce paragraphe, une introduction à la modélisation multicorps sera proposée ainsi qu'un bilan des différents modèles de moto existants.

1. Modélisation multicorps

Dans sa définition la plus générale, un système multicorps est un ensemble de corps, rigides ou flexibles, reliés entre eux par des liaisons [7] [8] [9]. Cette définition recouvre en fait un vaste champ d'applications, allant des robots manipulateurs aux véhicules sur pneus ou sur rails, en passant par les systèmes articulés les plus divers (organes de machine, antennes de satellite, engins de foire).

Quelle que soit l'application envisagée, l'analyse commence par l'étape de modélisation consistant à reconstituer le système à partir d'un certain nombre d'éléments standards (Figure 1), parmi lesquels on trouve toujours :

- des corps (ou solides), rigides ou flexibles ;
- des liaisons cinématiques, telles la liaison rotoïde (charnière), la liaison prismatique (glissière) ou la liaison sphérique (rotule), qui matérialisent les différents guidages intervenant entre les corps ;
- divers éléments de force comme des amortisseurs ;
- des liaisons de contact pneu-route qui se caractérisent non seulement par des contraintes cinématiques mais aussi par les efforts de contact particuliers qu'elles engendrent ;

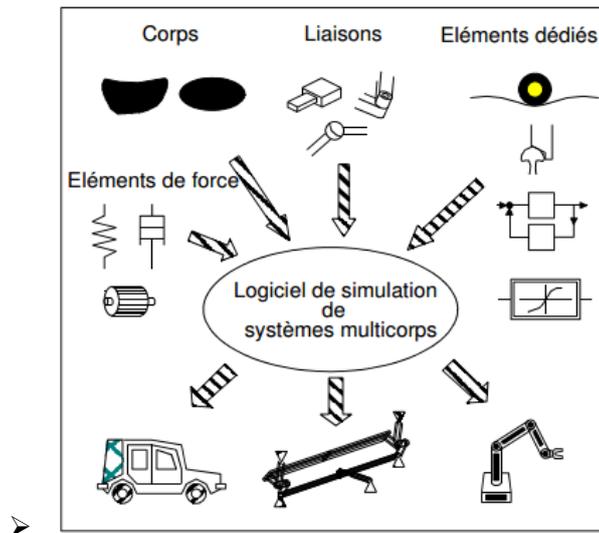


Figure 1 Schéma de principe de la modélisation multicorps [7]

Nous reprenons dans ce paragraphe les différents concepts que nous venons d'introduire – corps, liaisons, forces extérieures – en rappelant, pour chacun d'eux, la définition et quelques notions utiles à la compréhension de ce mémoire. Le lecteur désireux d'approfondir ses connaissances dans ce domaine pourra consulter, entre autres [8] et [10].

a. Les systèmes multicorps

Un système multicorps est un mécanisme composé de N corps liés entre eux par des liaisons internes et soumis à des liaisons externes.

L'un des corps est appelé corps de référence, c'est en général le sol pour ce type d'étude. Chaque autre corps est ensuite repéré par rapport au repère du corps auquel il est lié (déplacement relatif), ou par rapport au repère du corps de référence du système (déplacement absolu). Le degré de connexion (ou degré de connexité) d'un corps est défini comme l'entier représentant le nombre minimal de liaisons reliant ce corps au corps de référence.

L'architecture du mécanisme, c'est-à-dire l'agencement des corps entre eux, définit une topologie du système multicorps. Deux topologies sont à distinguer, comme présenté en Figure 2 :

- *topologie arborescente* : chaque corps est relié à un unique corps amont mais à un ou plusieurs corps aval, sauf pour les corps extrémités qui n'en possèdent qu'un. Il existe un seul et unique chemin pour aller d'un corps à l'autre.
- *topologie bouclée* : chaque corps est relié à au moins un corps amont. Il existe au moins un corps auquel il est possible « d'accéder » par plusieurs chemins.

La différence entre le nombre total de degrés de liberté des corps et le nombre total des contraintes imposées par les liaisons, représente le nombre de degré de liberté réel du système.

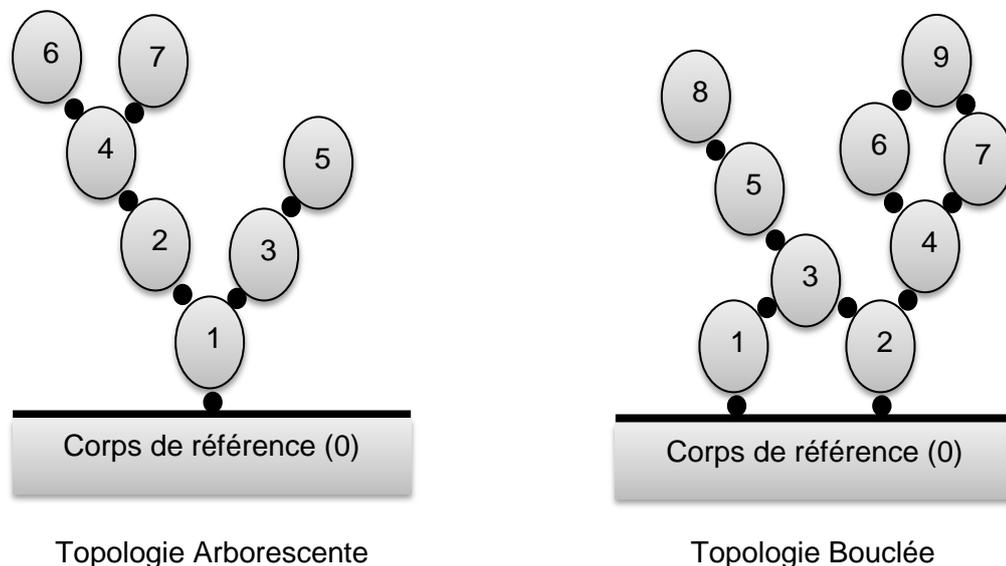


Figure 2 Topologie d'un système

b. Les corps

Un corps désigne un solide mécanique rigide. Les corps flexibles ne rentrant pas dans le cadre de cette étude, ils ne seront pas abordés. Chaque corps est défini par sa masse, son inertie et la position de son centre de gravité.

c. Les liaisons

Les liaisons peuvent être de natures différentes : internes au système multicorps (déformables ou non) ou externes.

Une *liaison interne* ou *joint*, est un dispositif reliant deux corps du mécanisme entre eux. Il en existe deux grands types :

- les liaisons *holonomes* qui n'introduisent que des contraintes sur les positions et les orientations relatives des corps. Elles se caractérisent par une fonction implicite du type :

$$f(x, y, z, q, r, p, t) = 0 \text{ où } t \text{ est le temps} \quad (1)$$

Si la fonction fait intervenir le temps on dit qu'elle est *rhéonome*, sinon elle est *sclhéronome*.

Exemple : la liaison plan sur plan.

- les liaisons *non holonomes* introduisant des contraintes sur les vitesses – et/ou accélérations – relatives des corps. Elles se caractérisent par une fonction implicite du type :

$$f(x, y, z, q, r, p, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{q}, \dot{r}, \dot{p}, t) = 0$$

avec $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{q}, \dot{r}, \dot{p}$ dérivées respectivement
de x, y, z, q, r, p par rapport au temps

(2)

Exemple : la liaison cylindre sur plan.

Une liaison holonome contraint les mouvements relatifs d'un corps par rapport à l'autre. Elle établit ainsi des relations entre les six degrés de liberté existant entre les deux corps, de telle sorte que, les positions relatives des deux solides ne dépendent plus que d'un nombre k ($k \leq 6$) de variables indépendantes. On dit alors que la liaison possède k degrés de liberté.

Par ailleurs, une liaison possède aussi un caractère de déformabilité ; c'est pourquoi on les sépare en deux grandes catégories : les déformables et les non déformables.

- les liaisons déformables : elles résultent de l'action d'un effort (une force, un moment, ...) entre les deux corps et se définissent par la donnée de la position de leur point d'application. Elles peuvent être linéaires ou non. Dans le cas linéaire, il peut s'agir par exemple d'un ressort ou d'un amortisseur liant les deux corps, dans le cas non linéaire, la liaison est définie par une loi.

- les liaisons non déformables : ce sont celles qui n'introduisent aucun effort dans le système c'est pourquoi on les appelle aussi liaisons internes cinématiques ou liaisons de contact. Elles sont de type pivot, rotule, glissière, plan sur plan, roulement sans glissement, ...

Une liaison externe se définit plus simplement comme l'action d'un effort extérieur au système. L'action d'une force ou d'un moment s'applique alors sur un seul et unique corps. Elle possède comme caractéristiques principales, le point d'application de la force sur le corps et la direction de la force.

d. Les principales approches topologiques

Pour aboutir aux équations différentielles qui permettent d'étudier le comportement dynamique du système multicorps envisagé, il est nécessaire de pouvoir exprimer la position et l'orientation de n'importe quel point du système en fonction d'un certain nombre de paramètres dits de configuration. Ces paramètres définissent complètement l'état du système et constituent les inconnues lors de l'analyse. C'est le choix de ces paramètres de configuration qui distingue les différentes approches topologiques (Figure 3).

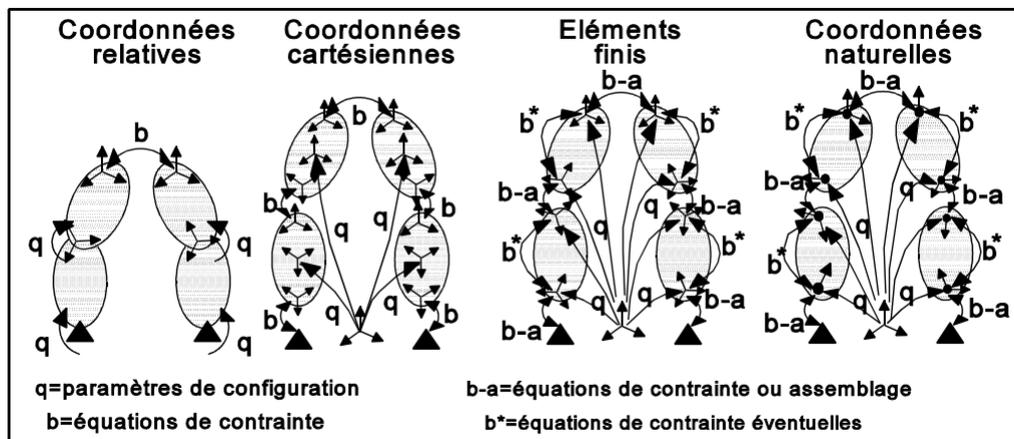


Figure 3 Les différentes approches topologiques [7]

Les robots manipulateurs ayant constitué une des premières applications de la discipline, les premiers chercheurs se tournèrent naturellement vers une approche en coordonnées relatives [9], [11]. Le système multicorps y est considéré comme un ensemble de chaînes cinématiques, éventuellement arborescentes, partant du bâti. La situation spatiale de chaque corps est calculée de façon réursive à partir du bâti, en fonction des variables décrivant

chacune des articulations. Quand le système comporte des boucles cinématiques, certaines liaisons ne peuvent être incluses dans les chaînes et doivent être traitées sous forme d'équations algébriques de contrainte, qui correspondent aux conditions géométriques imposées par les liaisons. Celles-ci sont ajoutées aux équations d'équilibre dynamique au moyen de la technique bien connue des multiplicateurs de Lagrange. On aboutit ainsi à un système d'équations algébro-différentielles. Toutes les liaisons ne sont donc pas traitées sur le même pied et c'est certainement avec un souci de systématisation que naquit l'approche en coordonnées cartésiennes.

Cette dernière [11], consiste à éclater le système en ses différents corps et à exprimer leur position et leur orientation en termes de coordonnées cartésiennes de translation et de rotation, les liaisons étant toutes exprimées sous forme d'équations de contrainte. Chaque corps possède six degrés de liberté qui lui sont propres, et toutes les liaisons sont traitées de façon uniforme, si bien que l'écriture des équations d'équilibre dynamique est très systématique.

Dans l'approche en coordonnées naturelles [12], apparue un peu plus tard, les paramètres de configuration correspondent aux coordonnées cartésiennes de points particuliers ou de vecteurs unitaires liés au système. Il s'agit en quelque sorte d'une variante des coordonnées cartésiennes, mais les coordonnées naturelles présentent l'avantage de simplifier le traitement des liaisons, qui se ramène souvent à la simple mise en commun de points ou de vecteurs unitaires, et revient donc finalement à un assemblage. D'autres équations de contrainte sont nécessaires pour exprimer la rigidité des corps ou fixer la norme des vecteurs unitaires, mais elles ont l'avantage d'être des fonctions simples des paramètres de configuration et d'apporter un excellent conditionnement pour l'intégration numérique.

e. Comment générer un modèle ?

Simuler le comportement d'un système mécanique consiste à résoudre les équations qui régissent le mouvement de son modèle au cours du temps. Ce travail demande donc au préalable l'établissement de ces équations. Il s'agit alors de créer le modèle mathématique d'un système mécanique.

Dans ce qui suit, les principales méthodes de mise en équations des systèmes mécaniques vont être présentées. Cette liste n'est pas exhaustive et toute la théorie ne sera pas présentée mais un résumé de chacune de ces méthodes est fait.

Parmi l'abondante littérature traitant de ce sujet, l'étude est basée sur des ouvrages généraux tel que [13] [14] [5].

Quatre méthodes sont à retenir :

Newton – Euler

Ce formalisme est le plus ancien, il consiste à appliquer à chacun des corps du système :

- le théorème du centre d'inertie dit : « Seconde loi de Newton » :

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

avec F les forces extérieures agissant sur le corps,
 m la masse du corps et
 a l'accélération du centre de gravité du corps. (3)

- le théorème du moment cinétique dit : « Postulat d'Euler » :

$$\sum \vec{M} = J \dot{\vec{\omega}} + \vec{\omega} \wedge J \vec{\omega}$$

avec M les moments d'inerties s'appliquantsur le corps,
 J la matrice d'inertie du corps et
 ω sa vitesse de rotation (4)

La difficulté majeure de cette méthode réside dans l'élimination des forces d'interaction entre les corps. En effet, cela se fait par le choix de sous-systèmes du mécanisme de base permettant de les faire disparaître dans les équations finales. Or, ce choix est non seulement délicat, mais entraîne une augmentation du système d'équations qui peut se révéler coûteuse.

Cependant, une telle méthodologie permet d'obtenir assez simplement les équations sous une forme implicite.

Principe de d'Alembert

Appelé aussi principe des travaux virtuels, le principe de d'Alembert consiste à écrire que le travail de la somme des forces et couples actifs internes ou externes au mécanisme et des couples d'inertie est nul :

$$\sum_{i=1}^n (m_i \ddot{\vec{x}}_i - \vec{F}_i) \times \Delta \vec{x}_i = 0 \quad (5)$$

avec $\Delta \vec{x}_i$ les déplacements virtuels.

Cela se traduit par des équations différentielles plus ou moins complexes suivant le choix du corps sur lequel on applique le principe.

La méthode de Lagrange

La méthode de Lagrange est sans doute la plus utilisée pour l'établissement des équations de mouvement. Elle consiste à relier les quantités de mouvement et d'accélération à l'énergie cinétique par le « Théorème de Lagrange » :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta Ec}{\delta \dot{q}} \right) - \frac{\delta Ec}{\delta q} = Q$$

avec Ec l'énergie cinétique,

q la coordonnée généralisée¹,

Q les efforts exercés sur le mécanisme.

(6)

L'avantage de cette méthode est qu'elle permet l'élimination des efforts internes (forces de liaisons), par contre elle est coûteuse en dérivation de l'énergie cinétique.

La méthode de Lie

Cette méthode s'appuie sur la géométrie différentielle et utilise les théorèmes généraux de la mécanique sous une forme Lagrangienne. Le principe est de transférer toutes les notions de

¹ Un solide peut être localisé à un instant t par ses coordonnées cartésiennes (x, y, z) ou par ses coordonnées polaires (cylindriques ou sphériques) ou enfin par trois coordonnées q_1, q_2, q_3 dans un référentiel quelconque nommées coordonnées généralisées.

mécanique classique de l'espace des variétés (vitesses, ...), noté \mathcal{V}_r , dans l'espace des déplacements, noté \mathcal{D} . On montre alors qu'il existe un isomorphisme entre les espaces \mathcal{V}_r et \mathcal{D} ; et que le groupe des déplacements, de par ses propriétés de différentiabilité (tout élément de cet ensemble est une fonction continue, différentiable), est un groupe de Lie. On utilise ces propriétés pour ramener le calcul différentiel de \mathcal{V}_r au calcul différentiel dans \mathcal{D} . Par la suite, des correspondances entre le champ des vitesses et celui des déplacements vont apparaître; et cela dans un espace de dimension six. On applique ensuite la théorie des torseurs dans cet espace. Par la suite, les équations du mouvement du système sont fournies par application du principe fondamental de la dynamique à savoir :

$$\dot{L} = H_r \dot{v} + [v, H_r(v)] = \sum F$$

avec H_r la matrice d'inertie du corps r ,
 v sa vitesse Lagrangienne, (7)
 F les forces extérieures et
 $[.,.]$ le crochet de Lie.

Parmi l'ensemble des méthodes permettant la génération des équations du mouvement, le formalisme des Groupes de Lie est sans nul doute le plus original mais également le plus complexe à appréhender. Les équations sont exprimés dans des espaces vectoriels de dimensions 6 et utilisent des notions mathématiques de calcul différentiel peu connues des ingénieurs [15].

Parmi les logiciels d'analyse de système multicorps, deux méthodes se distinguent pour la génération et le calcul des équations du mouvement : l'approche *symbolique* et l'approche *numérique* [16]. La Figure 4 illustre le déroulement des opérations d'analyse selon chaque approche. Les cadres en pointillés correspondent à un processus d'analyse numérique typique, à savoir l'intégration numérique des équations du mouvement du système.

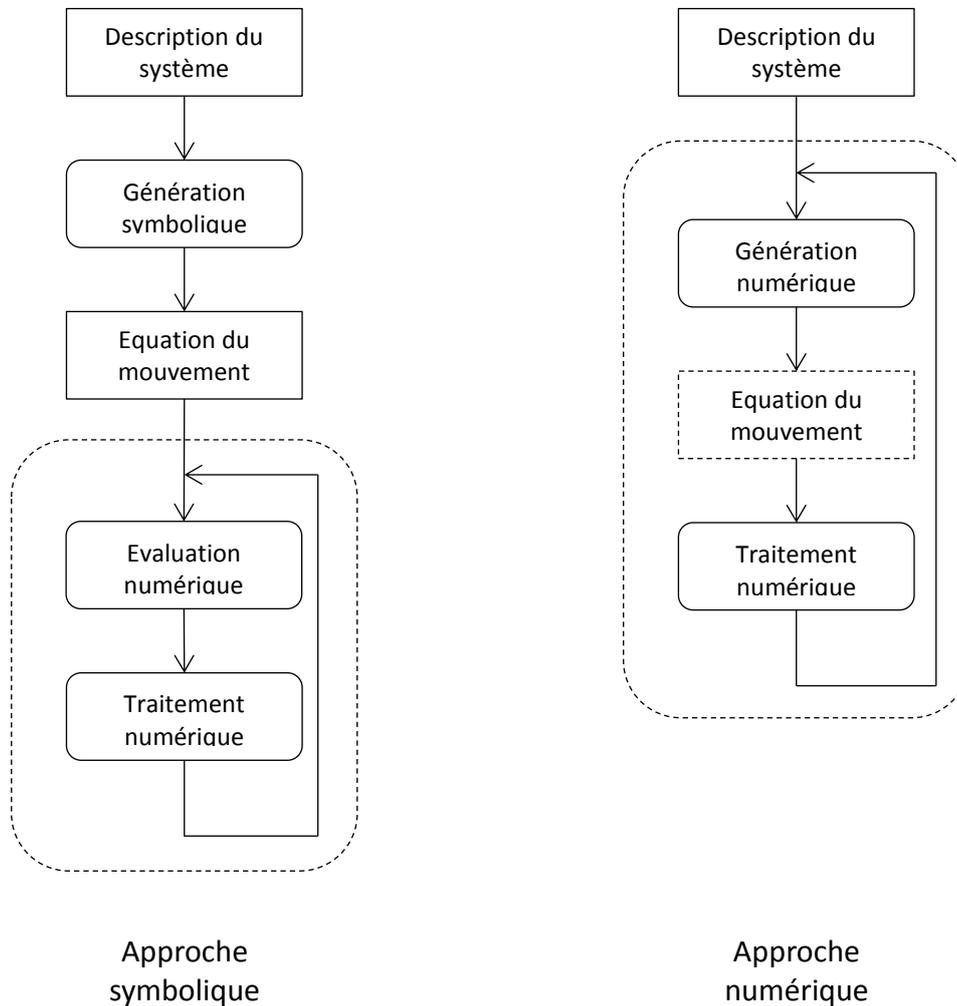


Figure 4 Comparaison des approches symbolique et numérique

Les programmes symboliques n'effectuent, a priori, aucun calcul numérique. Ils ne manipulent pas des nombres, mais des symboles qui correspondent aux coordonnées et aux paramètres du système pour produire les expressions analytiques des équations. Ces équations sont généralement exportées sous forme de fichiers qui contiennent des routines de calcul écrites en un langage de programmation standard. Ces routines peuvent alors être importées dans un environnement de calcul numérique pour être évaluées dans le cadre de l'analyse numérique du système. Les logiciels symboliques n'offrent pas nécessairement des possibilités de calcul numérique. Les avantages principaux de l'approche symbolique sont :

- optimisation des expressions analytiques des équations grâce aux manipulations symboliques,
- grande vitesse d'évaluation des équations générées sous forme analytique.
- facilité d'utilisation des équations dans la plupart des environnements de calcul numérique,

Les programmes numériques ne génèrent pas les expressions analytiques des équations. Les algorithmes des formalismes sont directement appliqués aux valeurs des coordonnées et des paramètres du système pour calculer numériquement les résultats des équations du mouvement. Les expressions analytiques des équations n'existent donc pas au sein du programme numérique, ce qui est illustré par le cadre en trait discontinu sur la Figure 4. En revanche, les programmes numériques offrent toujours la possibilité d'effectuer directement les diverses analyses numériques cinématiques et dynamiques applicables aux systèmes multicorps. Toutefois, il faut noter que les équations sont régénérées à chaque évaluation, ce qui prend plus de temps que l'exécution d'une sous-routine qui implémente la forme analytique des équations. Les avantages principaux de l'approche numérique sont :

- adaptation aux changements de configuration qui peuvent survenir dans le système,
- utilisation d'un seul logiciel pour la modélisation et l'analyse numérique du système.

En conclusion à ce paragraphe qui s'intéresse à la théorie de la mécanique multicorps, nous considérerons que l'objectif d'une modélisation multicorps consiste à connaître à chaque instant la position de chaque point du système étudié dans l'espace. Pour cela, la notion de corps mais aussi de liaison ont été introduite. Les principales approches topologiques et les méthodes de génération de modèle ont été abordées.

2. Modèles existants

Différents modèles de 2RM existent, ils ont des degrés de finesse variés et ont été développés pour différents objectifs. Une liste non exhaustive est dressée dans la suite de ce paragraphe. Pour chaque modèle présenté, le nombre de corps et de degrés de liberté ainsi que ses spécificités et son utilisation seront détaillés.

Modèle de Salim Maakaroun [17]

La modélisation est menée en utilisant le formalisme du robotisme basé sur la description géométrique de Denavit-Hartenberg modifiée. Le deux-roues est considéré comme un robot mobile qui est un système multicorps composé de douze corps et onze degrés de liberté, où le châssis est la base mobile et les roues sont les corps terminaux.

Les corps et les degrés de liberté se répartissent comme cela :

- C1 est le châssis qui possède six degrés de liberté avec le sol
- C2 et C7 sont respectivement les suspensions avant et arrière avec chacune un degré de liberté en translation
- C3 est le guidon avec un degré de liberté en rotation
- C5 et C9 sont les roues avant et arrière avec chacune un degré de liberté en rotation
- C4 et C8 sont deux corps virtuels liés respectivement à C3 et C7 par une articulation virtuelle pour définir un changement de repère
- C6 et C10 sont deux corps virtuels liés respectivement à C4 et C8 pour définir les repères de contact avec le sol

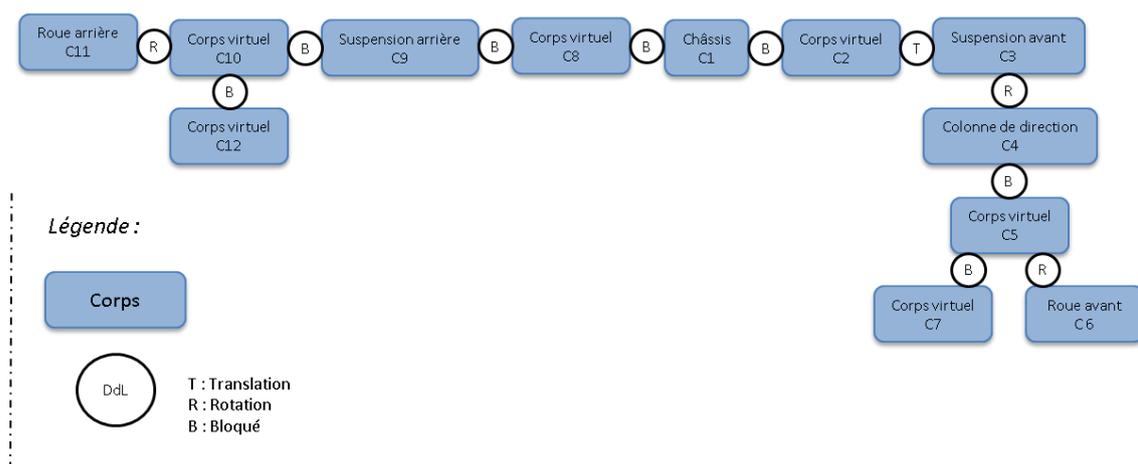


Figure 5 Architecture du modèle de Salim Maakaroun

Les efforts de contact pneu/chaussée sont calculés avec le modèle de Pacejka [18].

Modèle de Cossalter, Lot et Massaro [19]

Ce modèle a pour but de réaliser des analyses dynamiques complètes (analyse de la stabilité linéaire et du domaine fréquentiel). C'est pour cela que le modèle dispose d'un nombre de degrés de liberté important, vingt-neuf au total. Onze d'entre eux sont liés aux mouvements significatifs de la moto et dix-huit, à la déformation de la moto. Le modèle proposé possède neuf corps qui sont :

- la roue arrière qui possède un degré de liberté en rotation
- la partie arrière du cadre qui possède six degrés de liberté
- la partie avant du cadre
- la roue avant
- le bras oscillant qui possède un degré de liberté en translation
- les masses non-suspendues à l'avant qui possèdent un degré de liberté en translation
- le châssis avant qui possède un degré de liberté en rotation
- la partie basse du corps du conducteur
- la partie haute du corps du conducteur

Les dix-huit degrés de liberté liés à la déformation de la moto sont :

- trois degrés de liberté pour la déflexion du châssis
- un degré de liberté pour le déplacement latéral du conducteur
- deux degrés de liberté pour le lacet et le roulis
- quatre degrés de liberté pour la déformation des jantes
- un degré de liberté pour la déformation de la transmission
- deux degrés de liberté pour la déformation des biellettes de suspension arrière
- un degré de liberté pour la déformation en torsion de la direction
- un ou quatre degré(s) de liberté pour la déformation de la suspension avant (selon la suspension choisie)
-

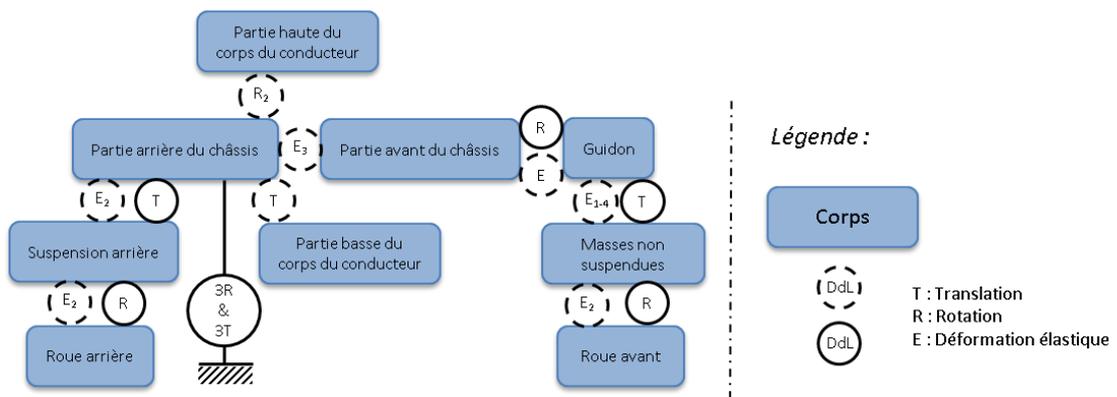


Figure 6 Architecture du modèle de Cossalter, Lot et Massaro

Les équations du mouvement ont été dérivées en utilisant l'approche symbolique à l'aide du logiciel MBSymba.

L'avantage de ce modèle est qu'il permet de simuler le comportement dynamique de la plupart des types de moto. Les fonctionnalités importantes du modèle sont les cinq types de suspension, la conformité structurelle du véhicule, la flexibilité de la transmission par chaîne et le modèle passif de conducteur. Ce modèle est utilisé notamment pour réaliser des études sur le couple appliqué par le conducteur sur le guidon.

Modèle de Sharp [20]

Ce modèle présente une spécificité dans la modélisation du train avant, elle est plus complexe que ce qui se fait habituellement. Cela permet une étude plus approfondie de la stabilité en particulier pour l'étude de l'équilibre en régime établi en virage.

Le modèle est composé de sept corps et treize degrés de liberté :

- le châssis avant qui possède deux degrés de liberté
- le châssis arrière qui possède six degrés de liberté
- la suspension avant qui possède un degré de liberté
- la suspension arrière qui possède un degré de liberté
- la roue avant qui possède un degré de liberté
- la roue arrière qui possède un degré de liberté
- la partie haute du corps du conducteur qui possède un degré de liberté.

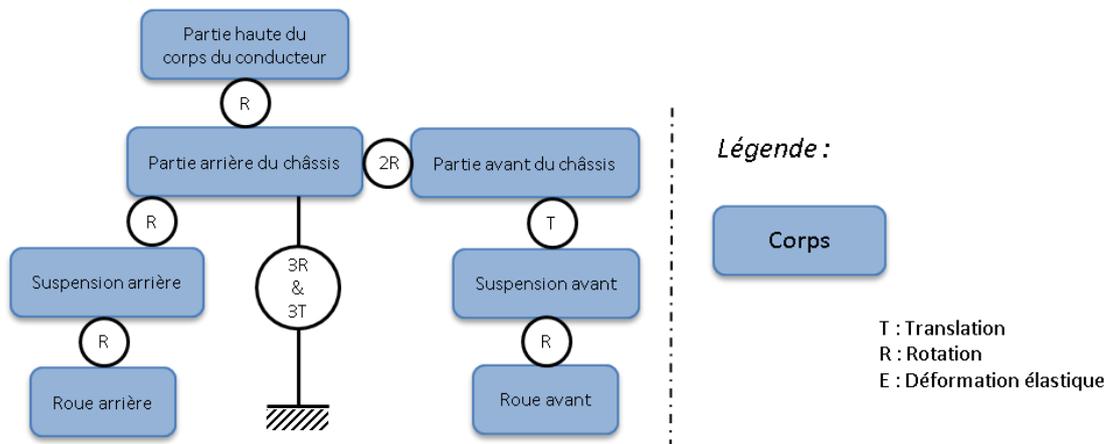


Figure 7 Architecture du modèle de Sharp

Le modèle de pneumatique utilisé est celui de Pacejka [21] [22]. La plateforme de simulation utilisée est Autosim, le code issu d'Autosim est utilisé pour générer une variété de modèles linéaires et non linéaires sous forme symbolique.

De manière générale, les modèles développés et présentés précédemment sont utilisés pour des études concernant la stabilité ou la dynamique du véhicule.

Ils ont tous un découpage différent ce qui engendre une diversité dans le nombre de corps et de degrés de liberté. Aucun d'entre eux n'est piloté avec des entrées réelles issues d'acquisition. De plus, les modèles existants en bibliographie n'ont jamais été utilisés pour traiter des reconstructions d'accidents.

III. Etude de la dynamique du deux-roues motorisé.

À ce jour, la dynamique du 2RM est moins connue et moins étudiée que celle des véhicules à quatre roues. Elle est aussi plus complexe car par nature le véhicule n'est pas auto stable. Les véhicules à deux roues présentent des angles de roulis plus important que les véhicules à quatre roues alors qu'à l'inverse, les véhicules à quatre roues sont soumis à des angles de glissement plus important que les véhicules à deux roues, comme on le voit sur la Figure 8.

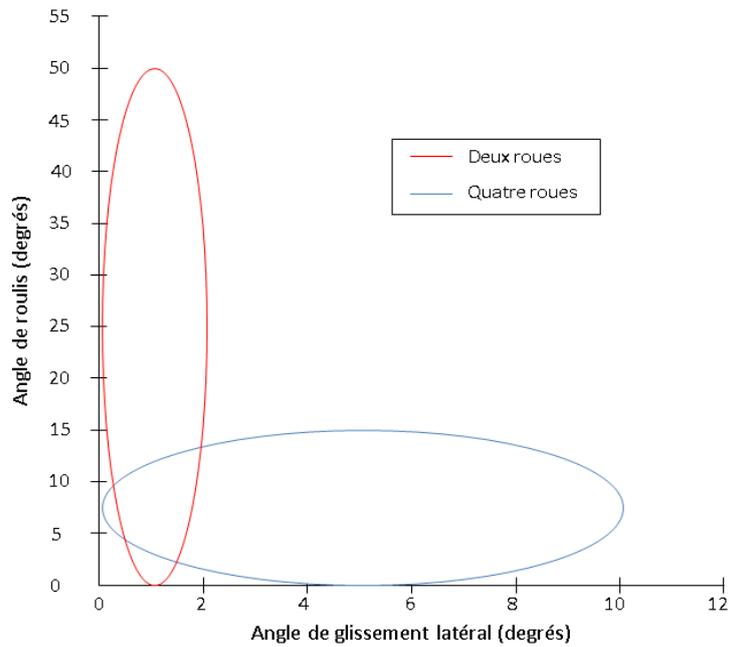


Figure 8 Limites des angles de glissement latéral et de roulis pour les véhicules à deux et quatre roues [23]

Le véhicule est libre de ses six mouvements dans l'espace. Les trois translations selon les axes x, y et z mais aussi trois rotations. La rotation autour de l'axe x est appelé roulis, la rotation autour de l'axe y est le tangage et la rotation autour de l'axe z correspond au lacet comme sur la Figure 9.

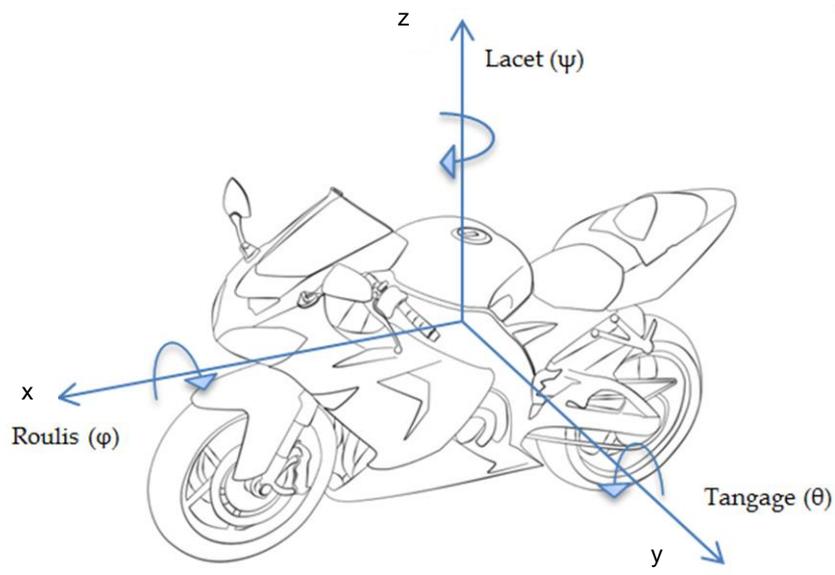


Figure 9 Définition des rotations remarquables

1. Géométrie d'un deux-roues motorisé

Même si chaque motocyclette est différente, la géométrie reste semblable et différents paramètres communs, qui ont de l'influence sur la dynamique propre à cette catégorie de véhicule sont à noter. Tous les concepts qui vont être présentés sont reportés sur la Figure 10.

a. L'angle de chasse

Une moto se compose de deux roues en contact avec le sol et pour qu'elle change de direction, il faut que le guidon tourne autour de l'axe de la colonne de direction, que l'on peut représenter par une liaison pivot. L'angle que fait la colonne de direction avec la perpendiculaire au sol passant par l'axe de la roue avant s'appelle l'angle de chasse de la roue, noté θ (voir Figure 10). La distance entre le point de contact pneu avant/chaussée avec l'intersection de l'axe de colonne de direction avec le sol s'appelle la chasse. L'angle de chasse et la chasse ont une très grande importance sur le comportement routier de la moto. Plus cet angle est faible, plus la moto est rapide à incliner, mais cela pourra engendrer des guidonnages. Inversement, plus l'angle est grand, plus la moto est stable mais difficile à mettre sur l'angle.

b. L'empattement

L'empattement est la distance entre le point de contact pneu/chaussée de chacune des roues (voir Figure 10). Ce dernier joue un rôle dans la stabilité de la moto. Plus l'empattement est grand, plus la moto est stable mais plus elle est difficile à contrôler latéralement. Plus l'empattement est court, moins la moto est stable mais plus le contrôle latéral est facile.

c. La position du centre de gravité

Le centre de gravité est en général situé légèrement plus en avant que le milieu de la moto à une hauteur d'une trentaine de centimètre. Sa position a énormément d'importance sur le comportement du véhicule. Placé plus haut, cela augmente le transfert de charge au moment des accélérations ou freinages et diminue la dérive latérale du véhicule en virage et inversement s'il est positionné plus bas. Si le centre de gravité est avancé, le cabrage est limité mais la stabilité au freinage diminue. Placé plus en arrière, la stabilité en virage augmente.

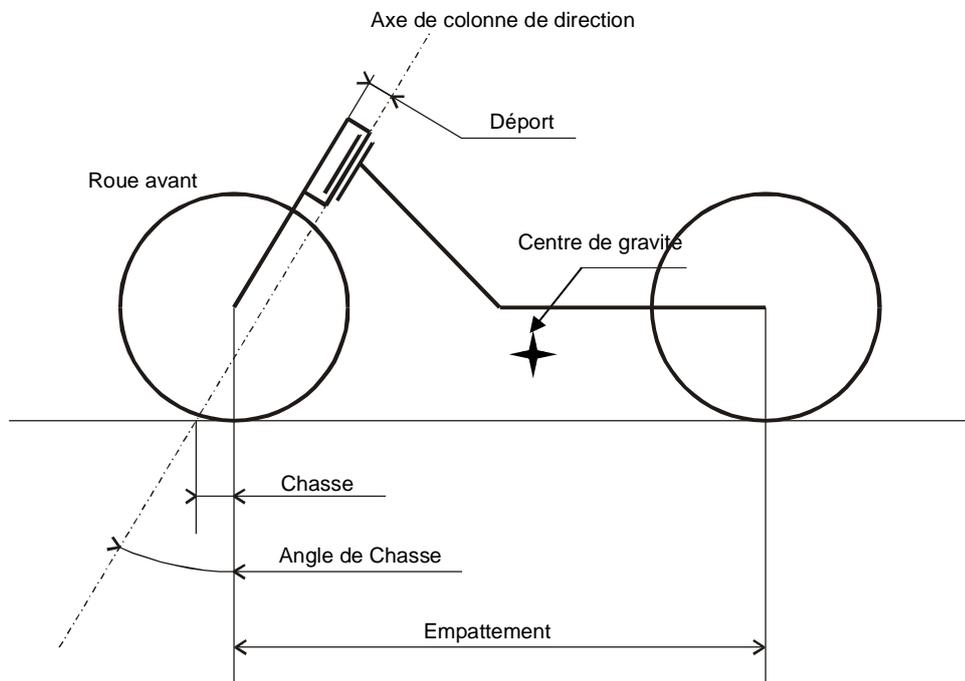


Figure 10 Géométrie d'une moto

d. Effet gyroscopique

L'effet gyroscopique apparaît lorsque la roue est soumise à deux rotations « d'axes perpendiculaires », c'est un « moment » qui agit sur un axe perpendiculaire aux deux autres. Le couple créé n'est que l'application d'une force liée à un mouvement de rotation. Ce phénomène a été mis en évidence par Berrita et Mitolo [24] pour les motos. Cependant c'est Foucault, qui a été le premier à poser les jalons de l'explication de ce phénomène avec son gyroscope [25].

La Figure 11 explicite bien ce phénomène, la roue effectue une rotation autour de son propre axe B ainsi qu'une rotation sur l'axe A lorsque le guidon est tourné. Il en découle un effet gyroscopique sur l'axe C.



Figure 11 Effet gyroscopique de la roue

e. Equilibre d'un deux-roues motorisé

L'équilibre des 2RM est très complexe, appelé « équilibre instable », puisque à vitesse nulle le véhicule est instable et que la liaison au sol est assurée par seulement deux aires de contact de petites dimensions.

- En ligne droite, pour que la moto « tienne debout », il faut que le centre de gravité soit situé au-dessus de la ligne formée par les deux points de contact pneu/chaussée et qu'elle soit soumise à la force gyroscopique. Les forces qui agissent alors sur la moto sont les forces normales des pneumatiques avant et arrière, la poussée qui permet de faire avancer le véhicule, la force de résistance à l'air et le poids comme détaillé sur la Figure 12. Ce modèle théorique n'est pas ce qui se produit en réalité. En effet, une moto n'effectue jamais de ligne droite parfaite. Mathématiquement la stabilité exige au moins trois points d'appui or la moto n'en a que deux, elle est donc instable. C'est le conducteur qui corrige en permanence ce déséquilibre et qui permet de maintenir la moto droite.

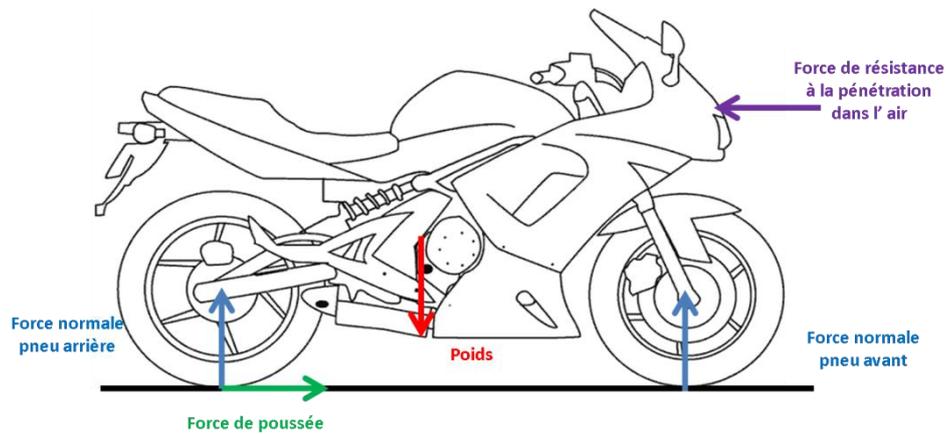


Figure 12 Bilan des forces en ligne droite

- En virage, la moto s'incline et est donc soumise à la force centrifuge qui la pousse vers l'extérieur du virage. L'étude de cette force centrifuge et de son influence a été publiée par R. Sharp [26]. Le schéma de la Figure 13 représente les forces agissant sur la moto lors de la prise de virage, ce dernier est simplifié car l'orientation du guidon est négligée et les forces que subissent les pneumatiques sont bien plus complexes que celles représentées. La somme de l'ensemble de ces forces reste nulle sur un plan latéral et vertical, seule la force longitudinale, qui fait avancer la moto, est toujours présente. Le pneu encaisse donc l'ensemble de la force centrifuge due au virage permettant ainsi à la moto de rester stable dans le virage.

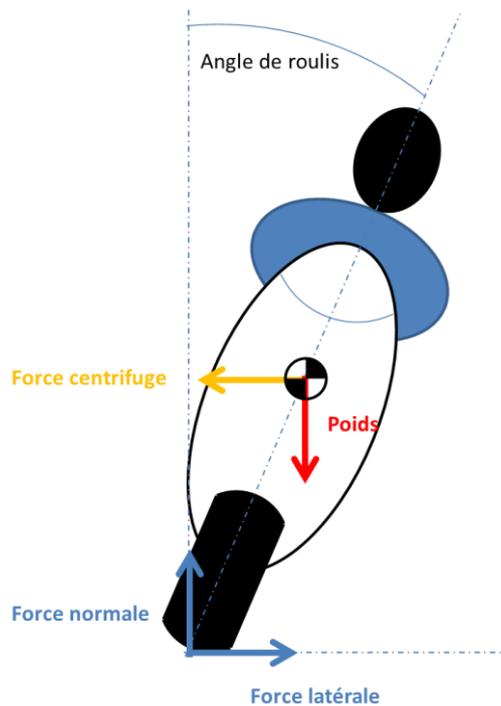


Figure 13 Bilan des forces en virage

2. Modélisation des efforts pneumatiques

Le pneumatique est l'un des composants les plus importants sur une moto. Sa caractéristique fondamentale est sa déformabilité, qui permet le contact entre la roue et la route même en cas de petits obstacles. En plus d'améliorer le confort du pilote, le pneu améliore l'adhérence, la performance d'une moto est largement influencée par les caractéristiques de ces pneus [27].

D'un point de vue dynamique de la moto, il est fondamental de définir le comportement des pneus dans différentes conditions d'utilisation à l'aide d'un modèle capable de représenter les forces et les moments de contact en fonction de la vitesse d'avance, de l'angle d'inclinaison, du glissement longitudinal, de la dérive et du chargement sur le pneu lui-même.

Macroscopiquement, les interactions du pneu avec la route peuvent être représentées par un système composé de trois forces et trois moments comme représentés sur la figure ci-dessous (Figure 14) :

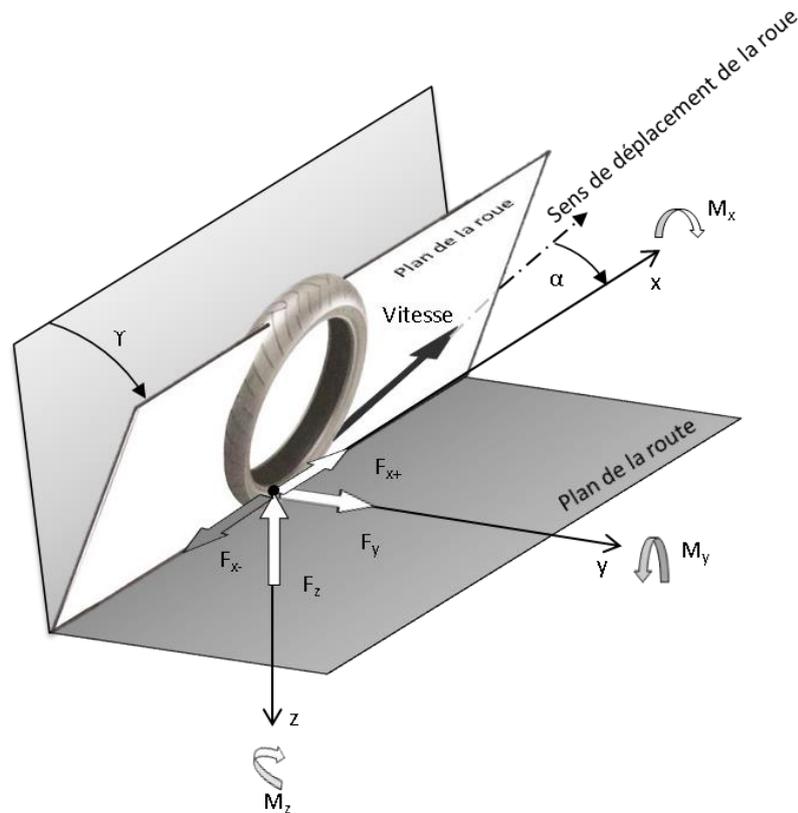


Figure 14 Forces et moments agissant au point de contact pneu/chaussée [23]

- Une force longitudinale F_x appliquée sur l'axe parallèle à l'intersection du plan de la route avec le plan de la roue et passant par le point de contact (défini positif en roulant F_{x+} et négatif en freinant F_{x-}) dans la direction x.
- Une force verticale et orthogonale au plan de la route (la charge verticale qui agit sur la roue est supposée positive vers le haut) sur l'axe z.
- Une force latérale F_y , dans le plan de la route, orthogonale à la force longitudinale dans la direction y.
- Un moment de renversement autour de l'axe x.
- Un moment de résistance au roulement autour de l'axe y.
- Un moment d'auto-alignement autour de l'axe z.

a. Grandeurs physiques conditionnant les efforts

Les efforts et les moments de contact sont linéairement ou non linéairement dépendant des quantités physiques générées par la dynamique du véhicule en interaction avec le sol. Ces quantités varient selon la géométrie du véhicule et la conception des pneumatiques.

➤ Angle de glissement latéral

L'angle de glissement latéral ou angle de dérive, est l'angle formé entre l'axe de la vitesse de déplacement du véhicule et le plan de symétrie de la roue. Sur les véhicules à quatre roues, l'angle de dérive peut atteindre 10° alors que sur un 2RM le maximum est de 2°.

La dérive dépend des vitesses latérale et longitudinale au point de contact et est définie par l'équation (8) [28]. Une différence est à noter entre les roues avant et arrière, lorsque la moto s'incline, la dérive de la roue arrière atteint des valeurs plus grandes que la roue avant.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{V_y}{|V_x|}\right) \quad (8)$$

➤ Glissement longitudinal

Le glissement longitudinal κ est défini dans l'équation (9), comme le pourcentage de différence entre la vitesse instantanée longitudinale du véhicule et la vitesse linéaire des roues [23].

$$\begin{cases} \kappa = \frac{R_e \omega - V_x}{V_x} \\ \kappa = \frac{R_e \omega - V_x}{R_e \omega} \end{cases} \quad (9)$$

ω est la vitesse de rotation de la roue

R_e est le rayon effectif (dynamique) de rotation

➤ Angle de carrossage

L'angle de carrossage γ , est l'angle formé par le plan de la roue et l'axe vertical au plan du sol. Pour un 2RM, l'angle de carrossage de la roue arrière γ_r , est égal à l'angle de roulis du châssis du véhicule et peut atteindre 55°. Quant à l'angle de carrossage de la roue avant γ_f , il est différent de celui de la roue arrière lorsque l'angle guidon est non nul. L'inclinaison du train avant est plus importante par rapport à celle du châssis lorsque l'angle guidon δ est différent de zéro et que le guidon est tourné vers l'intérieur du virage. Plus le guidon est tourné vers l'intérieur du virage, plus l'angle de carrossage de la roue avant est important. Ce dernier peut être exprimé en fonction de l'angle de roulis du châssis Φ , de l'angle guidon δ , de l'angle de chasse ε et de l'angle de tangage μ [23].

$$\gamma_f = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \Phi \cos \delta + \sin \delta \sin(\varepsilon + \mu)}{\cos(\varepsilon + \mu)} \cos(\gamma'_f - \varepsilon) \right) \quad (10)$$

Avec γ'_f la valeur en régime transitoire de γ_f

Dans le cas d'angle de roulis et d'angle guidon faible ainsi qu'en négligeant le tangage, l'équation (10) peut être simplifiée comme suit :

$$\gamma_f = \Phi + \delta \sin \varepsilon \quad (11)$$

➤ Longueur de relaxation

Il a été prouvé expérimentalement qu'il existe un décalage dans le temps entre le glissement latéral et la force latérale, ce dernier est caractérisé par la longueur de relaxation L dans l'équation (12). Elle représente la distance que la roue doit parcourir pour que la force latérale atteigne 63% de la force latérale en régime stationnaire [23].

$$L = \frac{K_\lambda}{k_s} \quad (12)$$

K_λ est la rigidité de dérive du pneumatique

k_s est la raideur latérale du pneumatique

Les valeurs de la longueur de relaxation de la force de virage se situent entre 0.12 et 0.45 m et augmentent légèrement avec la charge. Les petites valeurs correspondent aux vitesses faibles (20km/h), et les valeurs plus importantes aux très hautes vitesses (250 km/h).

➤ Transfert de charge

Le transfert de charge est une force verticale appliquée au point de contact pneu/chaussée due à la réaction du poids sur la route. Elle s'applique à la fois à l'avant et à l'arrière. Si elle augmente d'une part elle diminue de l'autre. D'importants transferts de charge ont lieu pendant les manœuvres de freinage et d'accélération. En phase d'accélération, le poids de la moto et du passager bascule sur l'arrière alors qu'en cas de freinage, c'est sur l'avant. Dans le cas où les pneumatiques et les suspensions sont considérées rigides, les charges sur les pneumatiques sont calculées comme dans l'équation (13) [29]

$$\begin{cases} F_{zf} = Mg \frac{L_r}{L_f + L_r} + \frac{h}{L_f + L_r} (F_{bf} + F_{br}) \\ F_{zr} = Mg \frac{L_f}{L_f + L_r} - \frac{h}{L_f + L_r} (F_{bf} + F_{br}) \end{cases}$$

avec F_{bf} et F_{br} les forces de freinage avant et arrière,
 L_f et L_r les distances respectives du point de contact pneu
 chaussée avant et arrière avec la position longitudinale du centre
 de gravité comme sur la Figure 15. (13)

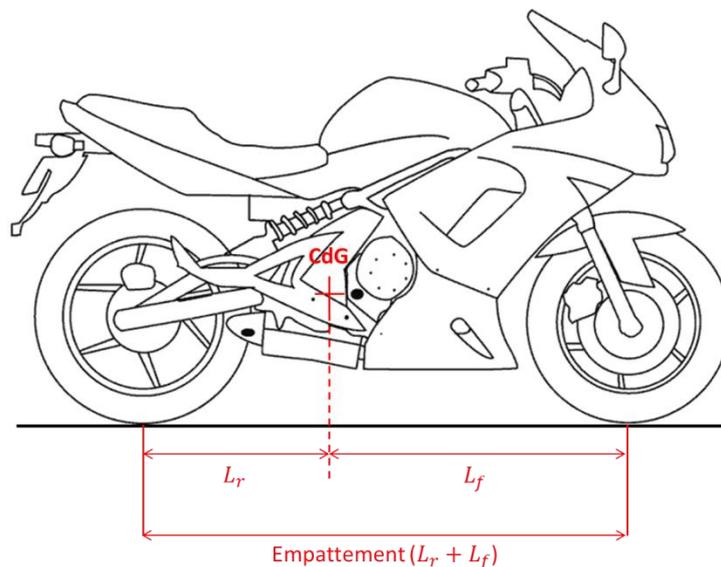


Figure 15 Paramétrage géométrique du centre de gravité

En ce qui concerne la modélisation des efforts de contact, de nombreux modèles pour les véhicules automobiles existent. Le modèle paramétrique de Pacejka est le plus connu mais des modèles physiques dits "analytiques" se démarquent : le modèle de Dugoff, de Gim et les modèles complexes de Guo et Lugre [30]. Par contre, pour les deux-roues motorisé, peu de modèle existent : la formule magique de Pacejka [21] et quelques modèles linéaires [31].

b. Modèle linéaire de pneumatique

Avec le modèle linéaire proposé, la force latérale et les moments autour des axes x et z sont définis comme dans l'équation (14) [23].

$$\begin{aligned}F_y &= C_{F\alpha} \alpha' + C_{F\gamma} \gamma' \\M_z &= -C_{M\alpha} \alpha' + C_{M\gamma} \gamma' \\M_x &= -C_{Mx\gamma} \gamma\end{aligned}\tag{14}$$

avec γ l'angle de roulis, γ' l'angle de roulis en régime transitoire, α' l'angle de dérive en régime transitoire et $C_{F\alpha}$, $C_{F\gamma}$, $C_{M\alpha}$, $C_{M\gamma}$ et $C_{Mx\gamma}$ les coefficients linéaires du modèle de pneu estimés à partir de tests expérimentaux

c. Modèle de Pacejka

Le modèle de pneu présenté ci-dessous est la version de la formule magique de Pacejka pour les véhicules à quatre roues adaptée au deux-roues motorisé [18]. Ce nouveau modèle autorise des angles de roulis bien plus importants. Il permet de calculer la force longitudinale, la force latérale et le moment d'auto-alignement.

- Calcul de la force longitudinale (avec dérive)

$$F_x = G_{x\alpha} F_{x0}$$

- Calcul de la force latérale (avec dérive)

$$F_y = G_{y\kappa} F_{y0}$$

- Calcul du moment d'alignement (avec dérive)

$$M_z = M_{zt} + M_{zr}$$

3. Modélisation des suspensions

a. Définition et histoire

Les deux roues de la moto sont reliées au châssis par un système de suspensions. Que ce soit à l'avant ou à l'arrière, la suspension est pratiquement toujours assurée par un ressort

(ou de l'air sous pression) associé à un amortisseur destiné à freiner les oscillations. Un réglage correct de la suspension et une pression correcte des pneus sont essentiels pour rouler en sécurité; ces réglages sont bien plus importants pour une moto que pour un véhicule à quatre roues car la moindre perte d'adhérence peut amener à la perte de contrôle de la moto.

La suspension avant est le plus souvent constituée de deux tubes coulissants intégrant des ressorts et des amortisseurs hydrauliques (fourche télescopique, Figure 16 (a)), mais de nombreux autres systèmes existent. Concernant la suspension arrière, il y a une plus grande diversité dans les systèmes existants. Toutefois deux d'entre eux sont à noter : le combiné double amortisseur Figure 16 (b) ou le mono amortisseur Figure 16 (c). Ils ont chacun leurs avantages et inconvénients mais sont tous deux équipés de ressort et d'un amortisseur.

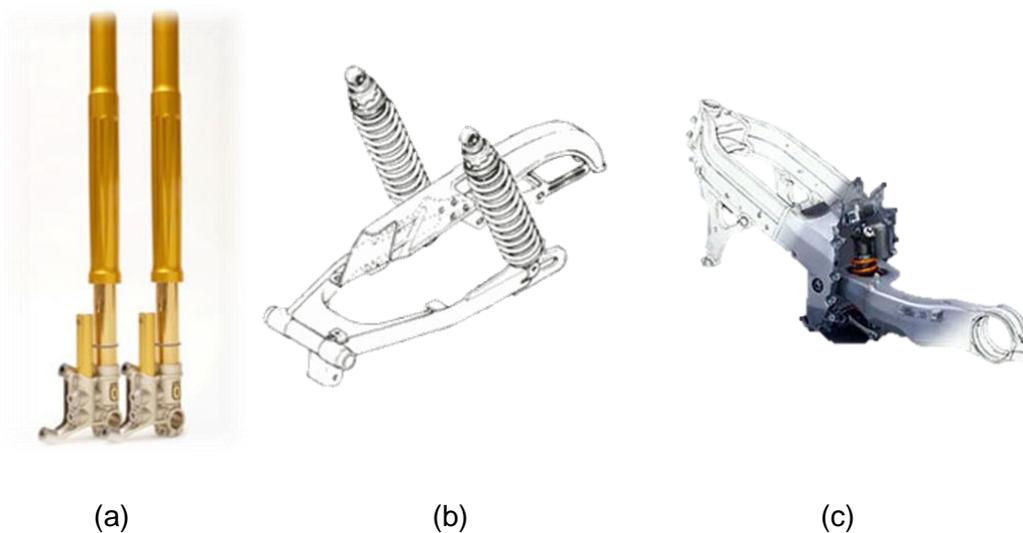


Figure 16 Fourche télescopique (a), double amortisseur (b), mono amortisseur (c)

Peu importe le type de suspension son rôle reste le même, elle a pour but d'assurer une liaison des roues au sol en toutes circonstances et ce quel que soit l'état de la route, la vitesse, l'angle de roulis ou la puissance du freinage.

Quelques termes techniques sont à connaître concernant les suspensions :

➤ La détente

Pour que l'amortisseur retrouve sa position initiale après une compression, de manière plus ou moins vite, le débit de l'huile dans l'amortisseur est régulé.

➤ La compression

Le débit d'huile dans l'amortisseur est également régulé pour permettre de régler la vitesse d'enfoncement de l'amortisseur.

➤ La raideur du ressort

Elle permet de régler la force de résistance à l'enfoncement du combiné ressort amortisseur.

➤ La précontrainte

Le ressort est plus ou moins comprimé à vide ce qui influe sur sa dureté.

b. Modèle théorique de suspensions

➤ Influence de la partie élastique

La fourche a un comportement légèrement progressif à cause de l'air contenu dans le fourreau qui agit comme un ressort pneumatique positionné en parallèle du ressort hélicoïdal.

La force élastique, avec l'influence du ressort pneumatique est donnée par l'équation (15).

$$F_e = k(\Delta y + y) + A p_1 \left(\frac{V_1}{V_1 - A y} \right)^{1.4}$$

avec k , la constante de raideur du ressort (15)

V_1 , le volume initial d'air contenu dans la fourche

A , la surface de la chambre cylindrique qui contient l'air

y , le déplacement vertical de la roue avant

p_1 , la pression initiale de l'air contenue dans la fourche

Δy , la précharge

En ce qui concerne la suspension arrière l'effet du ressort pneumatique n'est pas pris en compte.

➤ Influence de la partie amortissement

La force d'amortissement, avec l'influence du fluide visqueux est donnée par l'équation (16)

$$F_a = c \dot{y} \quad (16)$$

c, le coefficient d'amortissement
 \dot{y} , la vitesse de déplacement vertical de la roue

➤ Equation globale

La force globale traduisant les efforts de suspension est définie comme suit dans l'équation (17) :

$$F = F_e + F_a$$
$$F = k(\Delta y + y) + A p_1 \left(\frac{V_1}{V_1 - A y} \right)^{1.4} + c \dot{y} \quad (17)$$

IV. Conclusion

Au cours de ce chapitre, les différents éléments nécessaires pour le développement d'un modèle de deux-roues motorisé ont été présentés et détaillés. Les modèles numériques de deux-roues motorisé ont également été exposés. Il en ressort que les différents modèles existants sont basés sur la théorie de la mécanique multicorps. En effet, cette méthode permet une approche dynamique qui permet de connaître à chaque instant la position des différents éléments qui composent la moto. De plus, en raisonnant en terme de dynamique, il est possible d'appliquer sur le modèle des forces et des moments. Cela est indispensable pour pouvoir modéliser le comportement pneumatique par exemple. Ainsi, toute approche cinématique est écartée, de plus, elle ne permettrait pas de déceler une perte d'adhérence de la moto ce qui est primordial en accidentologie.

Précédemment, les différents éléments qui composent une moto ont été présentés. Il est important d'en avoir une bonne connaissance afin de pouvoir les modéliser au mieux. Chaque composant joue un rôle important : les pneumatiques sont indispensables pour assurer le contact avec la chaussée et ainsi définir les limites d'adhérence. Les suspensions, quant à elles, permettent d'assurer non seulement le confort mais surtout le maintien du contact pneumatiques / chaussée et participe à la stabilité du véhicule.

Une bonne connaissance de la dynamique du véhicule est importante afin de pouvoir définir l'architecture optimale du modèle mais également pour prendre en compte au mieux les forces qui agissent sur la moto afin de pouvoir développer un modèle capable de reproduire cette dynamique du véhicule si complexe.

Après la lecture de ce premier chapitre, il en ressort que la dynamique du deux-roues motorisé est très compliquée et que même si certains modèles existent, ils n'ont jamais été utilisés pour simuler des manœuvres d'urgences qui sollicitent fortement le véhicule. Concernant l'accidentologie, il y a un gros manque de données sur la phase de pré-choc d'un point de vue dynamique du véhicule. Jusque-là l'approche cinématique était utilisée mais elle ne permet pas, à priori, de déceler une perte de contrôle par exemple d'où l'intérêt de développer un modèle multicorps de deux-roues motorisé dédié à la reconstruction d'accident.

Chapitre 2

Modélisation du deux-roues motorisé pour la reconstruction d'accident

“

La modélisation est la conception d'un modèle. Selon son objectif et les moyens utilisés, la modélisation est dite mathématique, géométrique, 3D, dynamique, cinématique... Elle nécessite généralement d'être calée par des vérifications in situ, lesquelles passent par le paramétrage et le calibrage des « modèles » utilisés.

”

Dans le chapitre précédent, un “inventaire” des différents modèles a été présenté mais aussi une description détaillée des organes du deux-roues motorisé. Cela permet de dresser un état des lieux autour de ce thème et de faciliter les choix que nous aurons à faire en termes de modélisation. Dans ce chapitre, nous allons premièrement établir un cahier des charges afin de définir les besoins pour, dans un deuxième temps, développer un modèle de deux-roues motorisé. Ce modèle ainsi que son implémentation seront présentés par la suite.

I. Evaluation du besoin. Cahier des charges fonctionnel.

Traditionnellement, pour définir les besoins, un cahier des charges est établi. Cette phase est importante car elle permet de définir les attentes de l'utilisateur envers le produit et évite d'oublier certains paramètres importants ou même de “surcharger” le produit avec des fonctionnalités inutiles. Une méthodologie existe afin de réaliser le cahier des charges fonctionnel, pour cela différentes étapes sont à respecter [32] :

- Etablir la bête à corne pour énoncer le besoin [33]
- Placer le produit dans son environnement
- Représenter le diagramme pieuvre [33].

1. La bête à cornes. Enoncé du besoin.

Pour identifier le besoin principal ou le but de l'étude, l'outil « bête à corne » est utilisé. Elle permet de répondre à trois questions, *A qui le produit rend-il service ?*, *Sur quoi ou sur qui le produit agit-il ?* et tout ça *Dans quel but ?*. Une bête à corne concernant le développement d'un modèle de deux-roues motorisé est présentée Figure 17.

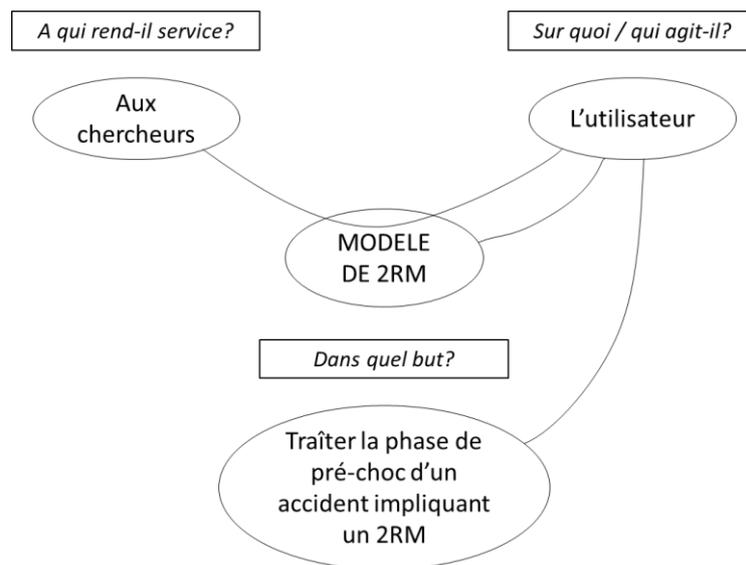


Figure 17 La bête à cornes

Dans notre cas, le produit *Modèle de 2RM* rend service *Aux chercheurs* en agissant sur *L'utilisateur* du modèle dans le but de *Traiter la phase de pré-choc d'un accident impliquant un 2RM*.

2. Expression fonctionnelle du besoin.

Pour formuler les différentes fonctions que doit satisfaire le produit, la méthode de la pieuvre est utilisée. Pour cela le produit est placé dans son environnement (Figure 18) ce qui permet ensuite d'établir le diagramme pieuvre (Figure 19) avec sa fonction principale (FP) et ses fonctions complémentaires (FC).



Figure 18 Le produit dans son environnement

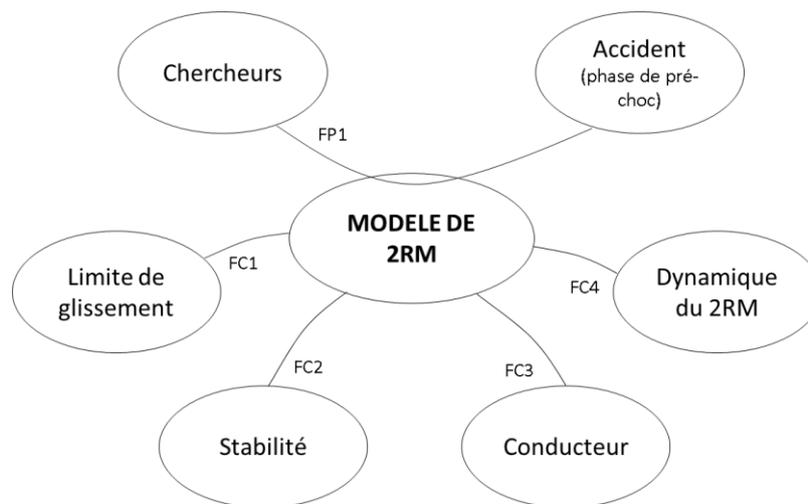


Figure 19 Diagramme pieuvre

- FP1 : Le modèle de deux-roues motorisé doit permettre aux chercheurs de traiter la phase de pré-choc d'un accident
- FC1 : Le modèle doit permettre de détecter la limite de glissement du deux-roues motorisé
- FC2 : Le modèle doit prendre en compte les éléments qui assurent la stabilité du deux-roues motorisé

- FC3 : Le modèle doit accepter comme entrées des actions du conducteur qui permettront de gérer la vitesse et la trajectoire du deux-roues motorisé
- FC4 : Le modèle doit être capable de traduire la dynamique du deux-roues motorisé lors d'une manœuvre d'urgence

3. Le cahier des charges fonctionnel

Une fois le besoin clairement défini, le cahier des charges fonctionnel peut être établi afin de préciser le besoin (Tableau 1).

Tableau 1 Cahier des charges fonctionnel

Fonction	Désignation	Critères	Niveau
FP1	Le modèle de deux-roues motorisé doit permettre aux chercheurs de traiter la phase de pré-choc d'un accident	Perte de contrôle	Vitesse < 130km/h
		Manœuvres d'urgence	Vitesse < 130km/h
FC1	Le modèle doit permettre de détecter la limite de glissement du deux-roues motorisé	Dérive du pneumatique	Selon modèle
		Angle de roulis	Angle > ≈ 55°
FC2	Le modèle doit prendre en compte les éléments qui assurent la stabilité du deux-roues motorisé	Suspension	Selon moto accidentée
FC3	Le modèle doit accepter comme entrées des actions du conducteur qui permettront de gérer la vitesse et la trajectoire du deux-roues motorisé	Vitesse	± 5%
		Trajectoire	± 5%
		Rotation guidon	± 30°
FC4	Le modèle doit être capable de traduire la dynamique du deux-roues motorisé	Rotation roues	360°
		Angle de roulis	≈ 55° avant glissement

Nous avons choisi les différents niveaux présentés dans le tableau ci-dessus en fonction des spécificités liés à la dynamique du véhicule lors de manœuvre d'urgence mais aussi en fonction des caractéristiques techniques de la moto.

Suite à l'analyse fonctionnelle réalisée, nous avons défini les besoins. Nous pouvons maintenant développer un modèle de deux-roues motorisé. Il devra prendre en compte les spécificités de la reconstruction d'accident et donc permettre de réaliser des manœuvres d'urgences telles que des freinages ou des évitements. Afin de traduire au mieux le comportement dynamique d'une moto il devra autoriser la rotation du guidon par rapport au châssis mais aussi la rotation des roues afin de pouvoir implémenter un modèle de pneumatique qui permettra de détecter la limite d'adhérence. Les suspensions permettront d'assurer la stabilité du véhicule aussi bien en virage qu'en phase de freinage d'urgence.

Le modèle sera développé sur la base de la moto instrumentée du laboratoire, une Honda VFR 800. Cette dernière permettra la validation du modèle. Il sera donc important lors de la modélisation de prendre en compte les spécificités de cette moto qui toutefois ne présente pas de caractéristiques particulières et est représentative de la majorité des motos en circulation.

II. Modèle multicorps développé.

1. Vue générale du modèle

La fiabilité d'un modèle dépend de sa complexité. Plus le nombre de corps est important, plus le modèle est fidèle au système mécanique mais plus le système a besoin d'être connu en détails et plus les calculs sont lourds. De plus, le degré de complexité du modèle dépend de son utilisation.

Dans cette étude, il est nécessaire d'avoir un modèle suffisamment détaillé pour ne pas "perdre" d'information concernant la dynamique très complexe du deux-roues motorisé et pour pouvoir implémenter les différents éléments évoqués précédemment.

Nous avons donc développé au cours de cette thèse un modèle multicorps à six corps et onze degrés de liberté. Les corps sont définis comme ci-dessous :

- La roue arrière
- Le corps de suspension arrière comprenant le bras oscillant
- Le corps principal comprenant le moteur, le réservoir, le châssis ainsi que le conducteur attaché rigidement
- Le corps de direction comprenant le guidon ainsi que les masses suspendues de la fourche

- Le corps de suspension avant comprenant les masses non suspendues de la fourche
- La roue avant

Le modèle accepte onze degrés de liberté qui sont :

- Un degré de liberté en rotation entre la roue arrière et la suspension arrière
- Un degré de liberté en rotation entre la suspension arrière et le châssis
- Un degré de liberté en rotation entre le châssis et le guidon
- Un degré de liberté en translation entre les parties supérieure et inférieure de la fourche
- Un degré de liberté en rotation entre la partie inférieure de la fourche et la roue avant
- Six degrés de liberté (trois degrés de liberté en rotation et trois degrés de liberté en translation) entre le corps principal et la roue.

A cela s'ajoute :

- Un modèle de suspension
- Un modèle de pneu
- Un couple appliqué sur le guidon afin de contrôler la trajectoire
- Une force de freinage ou de traction afin de contrôler la vitesse

Les suspensions avant et arrière ne sont pas des corps isolés mais leur effet est pris en compte dans les degrés de liberté qui les caractérisent. Pour les pneumatiques, le modèle de pneu est intégré dans les corps des roues avant et arrière mais n'est pas une force ou un moment appliqué directement sur le corps *Roue*. Concernant les entrées du modèle, des efforts (couple ou forces) appliqués sur les différents corps ont été préférés à un modèle de conducteur trop compliqué à développer.

L'architecture du modèle avec les différents corps, les degrés de liberté et les entrées est représenté Figure 20.

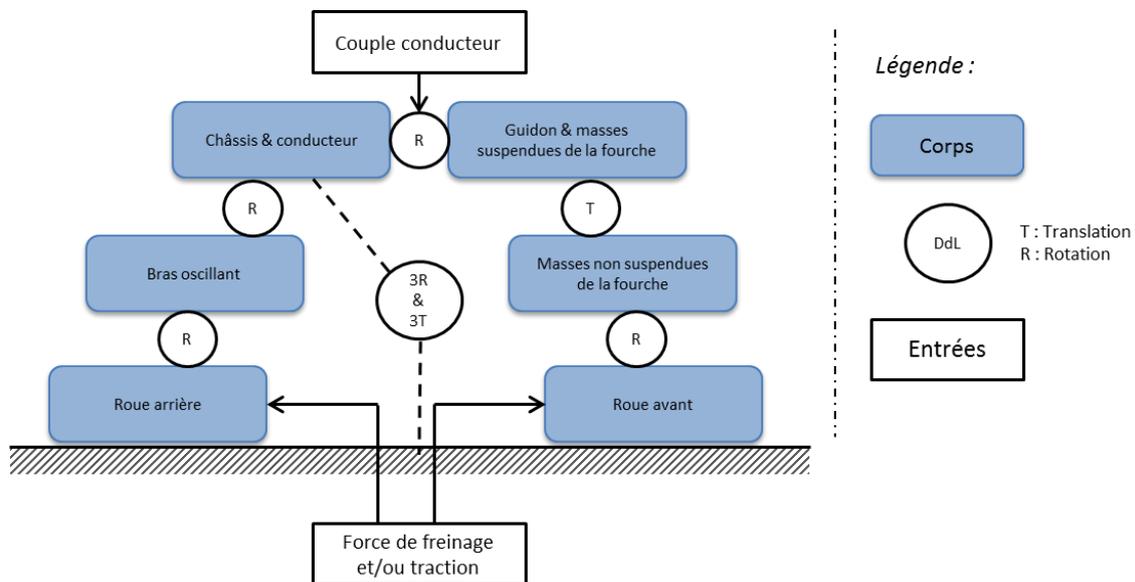


Figure 20 Architecture du modèle

2. Modèle de suspensions

Comme évoqué précédemment, le modèle est développé sur la base d'une Honda VFR 800. Cette moto est équipée d'une fourche télescopique classique à l'avant et d'un mono-amortisseur à l'arrière. Les modèles de suspension choisis devront donc correspondre aux spécificités techniques de ces dernières.

Comme évoqué dans le chapitre précédent, les suspensions avant et arrière sont caractérisées par un effet purement élastique dû au ressort et un effet viscoélastique dû à l'amortisseur.

La mise en équation de ces effets se traduit comme suit :

$$F = k(\Delta y + y) + A p_1 \left(\frac{V_1}{V_1 - A y} \right)^{1.4} + c \dot{y}$$

avec k , la constante de raideur du ressort

V_1 , le volume initial d'air contenu dans la fourche (18)

A , la surface de la chambre cylindrique qui contient l'air

y , le déplacement vertical de la roue avant

p_1 , la pression initiale de l'air contenue dans la fourche

Δy , la précharge

Pour l'étude qui nous concerne nous pouvons nous contenter des effets viscoélastiques sans prendre en compte l'air emprisonné dans la fourche qui est négligeable, l'équation globale est alors :

$$F = k(\Delta y + y) + c \dot{y} \quad (19)$$

Les suspensions ont été caractérisées à l'IMT de Grenoble sur un banc afin de définir les coefficients de raideur et d'amortissement. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 2.

Tableau 2 Coefficient de raideur et d'amortissement pour les suspensions avant et arrière

Suspension avant	Coefficient de raideur	10kN/m
	Coefficient d'amortissement	500Ns/m
Suspension arrière	Coefficient de raideur	90kN/m
	Coefficient d'amortissement	1600Ns/m

3. Modèle de pneumatiques

Comme évoqué précédemment dans le chapitre 1, le modèle de pneu de Pacejka est le modèle le plus abouti à ce jour et le plus utilisé [18]. Il permet de simuler de grands angles de roulis et les équations qui permettent de calculer les forces et moment sont fonctions de coefficients obtenus lors d'essais expérimentaux. Ainsi chaque pneumatique a des caractéristiques qui lui son propre. Dans le souci d'être le plus fidèle possible à la moto instrumentée, il est nécessaire de caractériser les pneumatiques de la VFR 800. Ces informations concernant les types de pneumatiques 120/70 à l'avant et 180/55 à l'arrière ont été trouvées en bibliographie [34]. Les équations permettant de calculer les efforts pneumatiques sont présentées en Annexe 1.

4. Paramétrage du modèle

a. Géométrie

Afin d'optimiser les résultats de la simulation lors de la validation du modèle, il est important de connaître les paramètres géométriques de la moto. C'est pour cela que nous avons

réalisé des mesures sur la Honda VFR 800 du laboratoire. En effet, pour pouvoir paramétrer le modèle il est important de connaître la géométrie de la moto afin de localiser les différents centres de gravité des différents corps mais aussi les points de liaisons entre les différents corps.

Le modèle est fait de telle manière que les seules données nécessaires à son paramétrage soient la longueur du bras oscillant, l'angle du bras oscillant, la position du centre de gravité en x et z de la moto, l'empattement de la moto, la longueur du tube supérieur de fourche, la longueur du tube inférieur de fourche et l'angle de chasse (Figure 21).

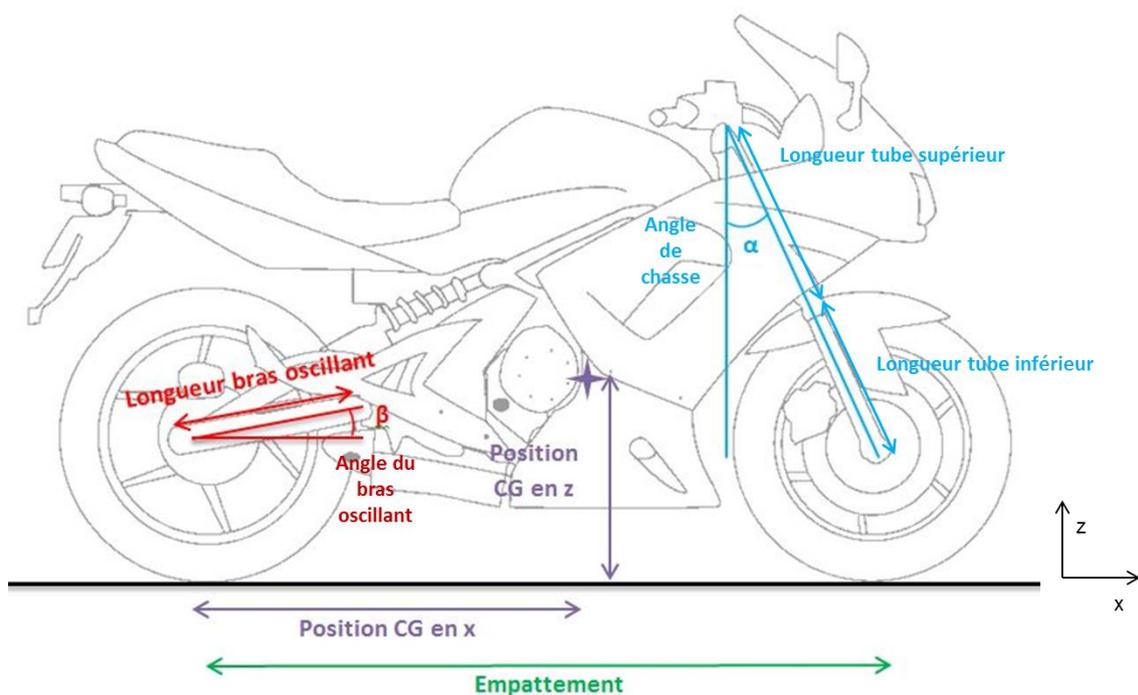


Figure 21 Paramétrage géométrique du modèle

Afin de déterminer de façon expérimentale la position du centre de gravité de la moto nous avons appliqué la méthode suivante :

Pour connaître la position suivant l'axe longitudinal il faut placer une balance sous la roue arrière et grâce à la formule suivante on peut retrouver la position.

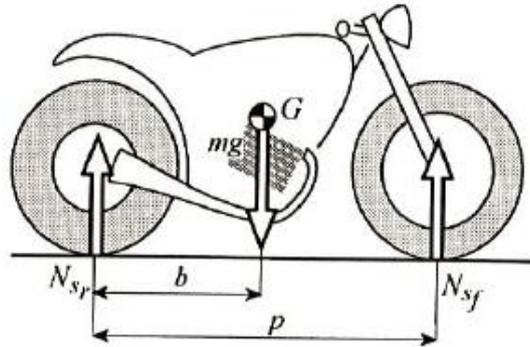


Figure 22 Méthode de la mesure de la position longitudinale du centre de gravité de la moto

$$b = \frac{N_{sf} p}{mg} = p - \frac{N_{sr} p}{mg} \quad (20)$$

Pour connaître la hauteur du centre de gravité il faut surélever la roue avant de la moto d'une hauteur connue et placer une balance sous la roue arrière, avec la formule qui suit on peut alors déterminer la hauteur du centre de gravité.

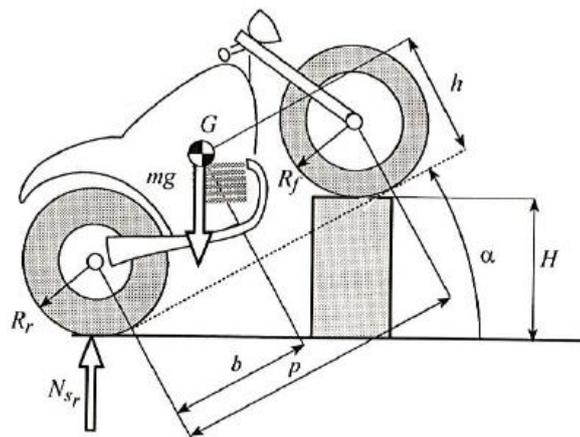


Figure 23 Méthode de mesure de la position verticale du centre de gravité de la moto

$$h = \left(\frac{N_{sr} p}{mg} - (p - b) \right) \cot \left[\arcsin \frac{H}{p} \right] + \frac{R_r + R_f}{2} \quad (21)$$

Après calculs et mesures, les paramètres géométriques nécessaires à la caractérisation de la Honda VFR 800 en vue de la modélisation sont répertoriés dans le Tableau 3.

Tableau 3 Paramètres géométriques de la Honda VFR 800

Longueur du bras oscillant	0.55m
Angle du bras oscillant	7°
Position du centre de gravité en x	0.586m
Position du centre de gravité en z	0.749m
Empattement	1.1475m
Longueur du tube de fourche supérieur	0.4m
Longueur du tube de fourche inférieur	0.36m
Angle de chasse	24°

b. Masses et inerties

Une bonne caractérisation de la moto ne passe pas uniquement par sa géométrie mais également par sa masse et son inertie. Comme dans tous systèmes dynamiques, la masse et l'inertie jouent un rôle important, c'est pour cela qu'il est important de les évaluer avec précision pour optimiser les résultats de la simulation.

La détermination des masses de chacun des corps n'est pas compliquée à obtenir expérimentalement mais assez longue. En revanche, l'obtention des inerties autour des trois axes pour chacun des corps qui composent la moto n'est pas aussi directe. La méthode du pendule [35] permet d'obtenir la matrice de chacun des corps et possède l'avantage de ne pas nécessiter de beaucoup de matériel. Elle consiste à suspendre chaque corps par un point, de façon que l'axe de rotation soit colinéaire avec l'un des trois axes principaux. En enregistrant les oscillations de la masse suspendue, il est possible d'estimer la période des oscillations et d'en déduire le moment d'inertie du véhicule suivant l'axe à l'aide du théorème de Huygens (voir Annexe 2).

Par conséquent, en répétant cette procédure pour les trois axes principaux du véhicule, on obtient les trois moments d'inertie principaux au centre de gravité de chacun des corps.

Le principal inconvénient de cette méthode est qu'il est nécessaire d'isoler physiquement chacun des corps de la moto. En effet, que ce soit pour peser chacun des corps pour définir leurs masses respectives ou pour mesurer leurs inerties, il est nécessaire de procéder au démontage de la moto. C'est une opération assez lourde qui nécessite des connaissances en mécanique moto pour démonter chacune des roues et les étriers de freins associés, le

bras oscillant et la transmission, la colonne de direction et la fourche. De plus, cette intervention s'avère longue (plusieurs semaines) et nécessite une immobilisation complète de la moto le temps de réaliser le démontage, les différentes mesures et le remontage. C'est pour les raisons évoquées précédemment que les mesures de masses et d'inerties n'ont pas pu être réalisées, les valeurs implémentées dans le modèle proviennent donc de la bibliographie.

Chaque moto a une masse et des inerties qui lui sont propres, la difficulté est de trouver en bibliographie les valeurs relatives à la Honda VFR 800. Pour ajouter de la complexité, les masses et inerties globales du véhicule ne suffisent pas puisque qu'il faut les valeurs numériques propre à chaque corps. Il faut donc trouver un modèle existant, de Honda VFR 800 de préférence, où les corps sont isolés de la même manière que dans celui proposé dans cette étude. La recherche étant infructueuse, la solution est de se tourner vers un modèle d'Aprilia RSV 1000, qui reste une moto de même catégorie, proposé par Cossalter et Lot [36].

Les masses des deux véhicules sont différentes. En effet, l'Aprilia RSV 1000 pèse 277 kilogrammes alors que la Honda VFR 800 pèse 342 kilogrammes. Afin de déterminer les masses et les inerties de chacun des corps de la Honda VFR 800, nous avons calculé le pourcentage de masse que représente chaque corps par rapport à la masse globale de l'Aprilia RSV 1000. Par la suite, ces ratios ont été appliqués à la masse totale de la Honda pour obtenir les masses des différents corps de cette dernière. Concernant les inerties, la même opération a été réalisée. L'inertie est définie par l'équation suivante :

$$I = m \times d^2 \quad (22)$$

avec m la masse du corps et d la distance entre la masse et un point de référence choisi

Connaissant la masse et l'inertie de chaque corps de l'Aprilia, la valeur de d^2 a été calculée. La Honda et l'Aprilia étant des motos de catégorie semblable, la distance d^2 est considérée inchangée. Le calcul inverse peut donc être fait pour la Honda maintenant que la masse et que la valeur d^2 sont connues et ainsi est calculée l'inertie de chaque corps de la moto qui sera implémenté dans le modèle. Toutes les valeurs de masses et d'inerties des différents corps sont répertoriées dans le Tableau 4.

Tableau 4 Masses et inerties des différents corps pour la Honda VFR 800 et l'Aprilia RSV 1000

Aprilia RSV 1000								
Corps	Masse (kg)	% de masse totale	Inertie = Mass x d ² (kgm ²)					
			lxx	d ²	lyy	d ²	lzz	d ²
Bras oscillant	10*	3.6	0.2*	0.02	0.8*	0.08	0.8*	0.08
Châssis	223*	80.5	24.4*	0.11	26.2*	0.12	30.3*	0.14
Guidon	8.75*	3.2	0.29*	0.03	0.14*	0.02	0.21*	0.02
Masses non-suspendues	7*	2.5	0.22*	0.03	0.18*	0.03	0.07*	0.01
	277*							

Honda VFR 800								
Corps	Masse (kg)	% de masse totale	Inertie = Mass x d ² (kgm ²)					
			lxx	d ²	lyy	d ²	lzz	d ²
Bras oscillant	12.3	3.6	0.25	0.02	0.98	0.08	0.98	0.08
Châssis	275.3	80.5	30.12	0.11	32.35	0.12	37.41	0.14
Guidon	10.9	3.2	0.36	0.03	0.18	0.02	0.26	0.02
Masses non-suspendues	8.6	2.5	0.27	0.03	0.22	0.03	0.09	0.01
	342							

* valeurs issues de la bibliographie

5. Synthèse du modèle

Nous avons développé au cours de ces travaux un modèle mult Corps de deux-roues motorisé. Il est composé de six corps et onze degrés de liberté. Une représentation cinématique de ce dernier est proposée Figure 24.

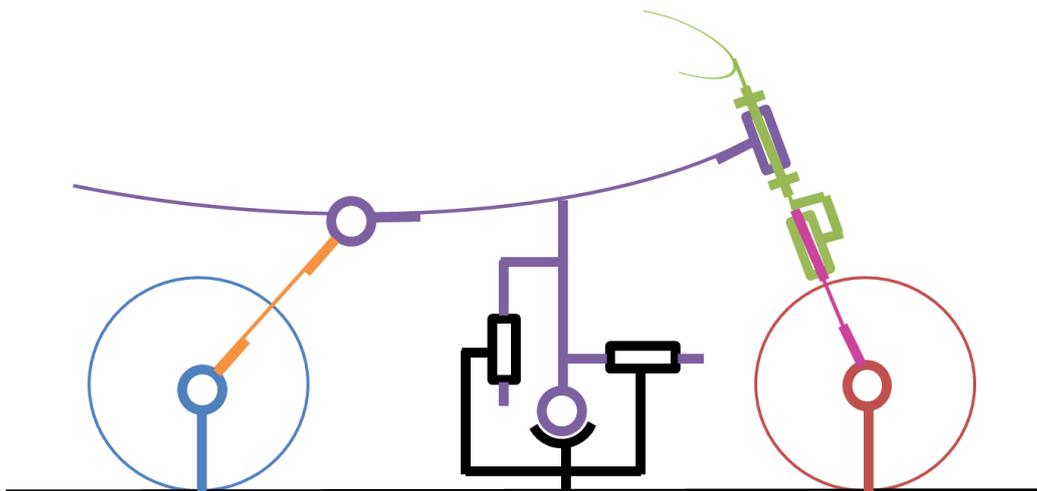


Figure 24 Schéma cinématique du modèle de deux-roues motorisé

Il a été conçu de manière à être capable de simuler des manœuvres d'urgence et des pertes de contrôle. La Formule Magique de Pacejka permet de calculer les efforts pneumatiques et le modèle est construit aussi bien en termes de géométrie que de masses et d'inerties sur la base d'une Honda VFR 800, moto qui servira à la validation du modèle ainsi développé.

III. Implémentation du modèle

Différents outils de modélisation multicorps existent. Ils sont basés sur une approche numérique (ADAMS [37], DADS [38], Dymola [39]) ou symbolique (Autosim [40], SimMechanics [41]). Une fois le modèle construit, une décision doit être prise quant au logiciel qui permettra d'implémenter ce dernier. Chaque logiciel présente des avantages et des inconvénients mais SimMechanics est celui qui est apparu comme être le logiciel qui nous convient le mieux car il dispose de toutes les fonctionnalités pour modéliser tous les composants de la moto qui nous intéressent. En effet, SimMechanics est un environnement de modélisation de schéma-bloc pour l'ingénierie et la simulation de systèmes à corps rigides en utilisant la dynamique newtonienne des forces et des moments. Cet outil est commercialisé par la société Mathworks, cela présente un énorme avantage car il y a 100% de compatibilité avec le logiciel de calcul Matlab. Ce dernier étant un puissant outil capable de traiter les phases de pré simulation (interface graphique, implémentation des paramètres du modèle) et post simulation (analyse des résultats issus de la simulation, matrice des résultats) avec une passerelle directe vers SimMechanics, son utilisation nous est apparue évidente.

1. Utilisation de Matlab/Simulink/SimMechanics pour le développement du modèle.

Comme présenté dans la Figure 26, le modèle est composé de six corps dans l'encadré rouge, de onze degrés de liberté dans l'encadré bleu, les suspensions sont modélisées dans l'encadré violet et les entrées du modèle dans l'encadré orange. Comme on peut le voir dans la Figure 27, il y a de nombreux repères. Il est nécessaire d'opérer un changement de repère à chaque fois qu'il y a un point à placer pour caractériser la position du centre de gravité d'un corps ou la position de l'articulation entre deux corps.

Concernant les efforts induits par les pneumatiques, ils sont directement contenus dans le corps de chaque roue. Le modèle de pneu implémenté est le modèle Delft-Tire/MF-Tire [42] développé par la société Tass Internationale en Figure 25. C'est un modèle basé sur la Formule Magique de Pacejka adaptée au deux-roues. L'approche semi-empirique de MF-Tire permet une simulation rapide et robuste des forces et moments de contact pneu-route pour le comportement permanent et transitoire. Le modèle MF-Tyre a été largement validé par de nombreuses expériences dans différentes conditions. Le modèle MF-Tyre calcule les forces (F_x, F_y) et les moments (M_x, M_y, M_z) qui agissent sur le pneu pour des conditions de glissement pur et combiné sur une surface en utilisant le glissement longitudinal, latéral, induit lors de la prise de virage, l'inclinaison de la roue et la force verticale F_z comme entrées. Le modèle est valide pour des grands angles de dérive et des grands angles d'inclinaisons qui sont particulièrement typique d'une moto [43].

Afin de détecter la chute, nous nous basons sur les données issues du modèle de pneumatique. Après analyse des résultats de simulation, nous estimons que lorsque les trois forces et les trois moments atteignent des valeurs aberrantes le modèle a chuté. Nous détaillerons la méthode de détection de chute du modèle numérique dans le paragraphe 8. Détection de la chute page 158.

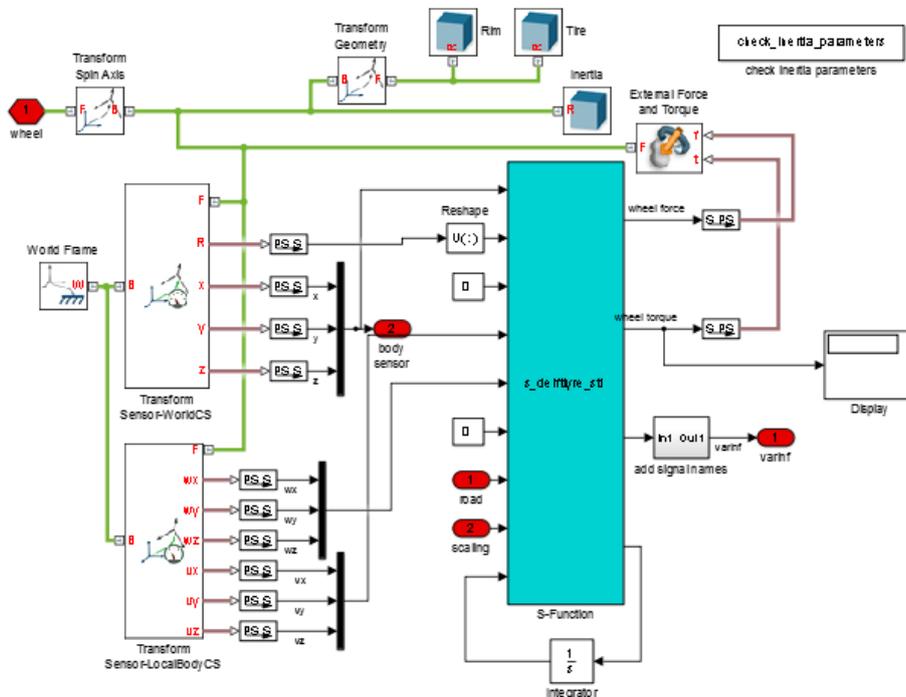


Figure 25 Modèle de pneumatique

Le Tableau 5 propose le paramétrage complet du modèle. On y retrouve pour chaque corps, les masses, inerties et repère associé respectifs ainsi que les Inputs et Outputs. De plus, pour chaque liaison, le type de liaison, les efforts extérieurs qui s'y appliquent, les Inputs et Outputs ainsi que les repères associés sont présentés.

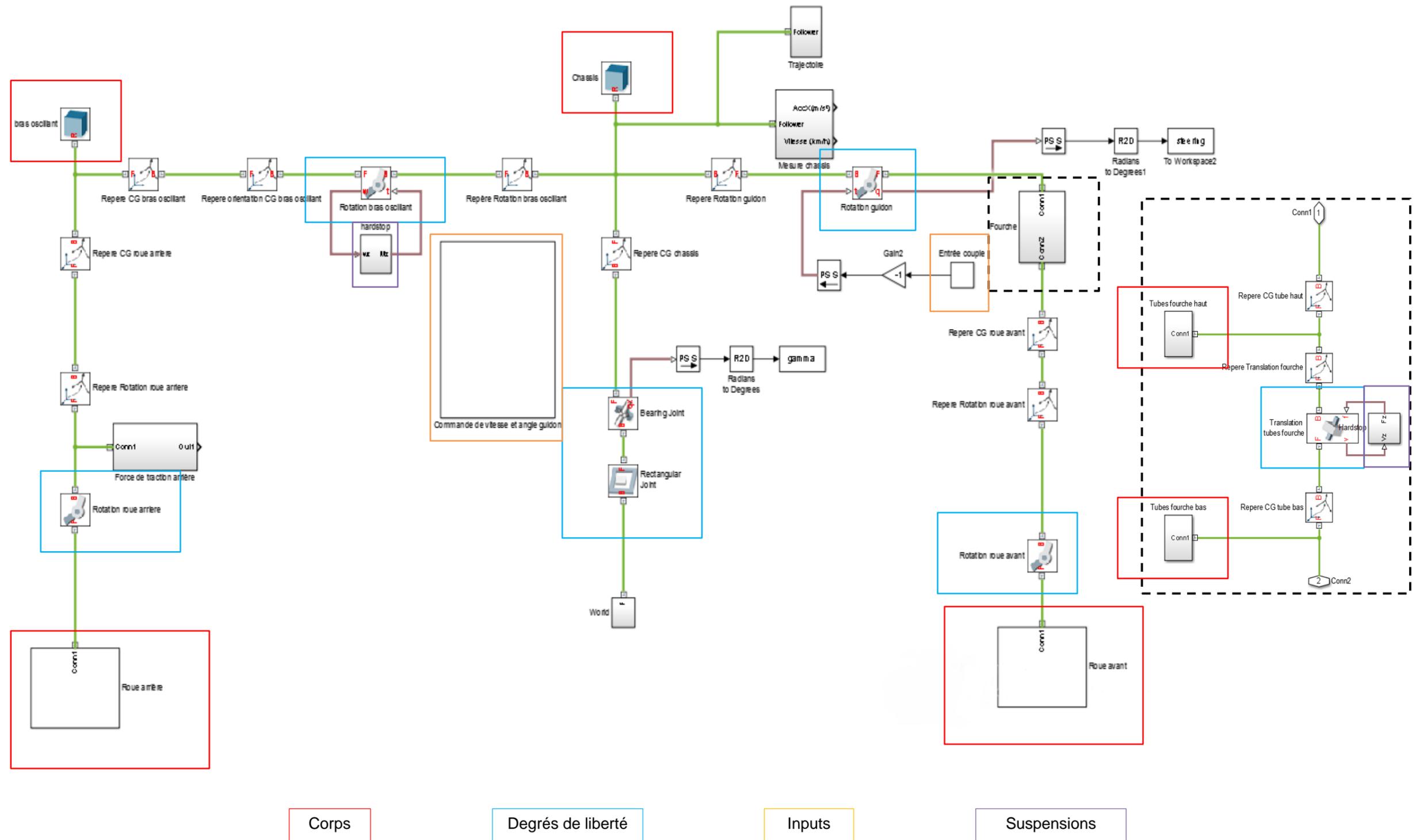


Figure 26 Modèle implémenté dans Matlab/Simulink/SimMechanics

Chapitre 2
Modélisation du deux-roues motorisé pour la reconstruction d'accident

Tableau 5 Paramétrage du modèle

	Masse (kg)	Inertie (kg.m ²)	Repère associé*	Input	Output	Effort extérieur	Type
Roue arrière	6.2	0.27 0.48 0.27	R1	x, y, z $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ Vx, Vy, Vz	Fx, Fy, Fz Mx, My, Mz	X	Corps
Roue avant	4.1	0.16 0.33 0.16	R9	x, y, z $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ Vx, Vy, Vz	Fx, Fy, Fz Mx, My, Mz	X	Corps
Bras oscillant	12.3	0.25 0.98 0.98	R2	X	X	X	Corps
Châssis	275.3	30.12 32.35 37.41	R4	X	X	X	Corps
Guidon	10.9	0.36 0.18 0.26	R6	X	X	X	Corps
Fourche	8.6	0.27 0.22 0.09	R8	X	X	X	Corps
Roue avant / Fourche	X	X	R9	X	X	Force de freinage	Liaison rotation
Fourche / Guidon	X	X	R7	z, \dot{z}	F _{suspension}	X	Liaison translation
Guidon / Châssis	X	X	R5	X	X	Couple conducteur	Liaison rotation
Châssis / Bras oscillant	X	X	R3	Ω_z, ω_z	C _{suspension}	X	Liaison rotation
Bras oscillant / Roue arrière	X	X	R1	X	X	Force de traction / freinage	Liaison rotation
Châssis / Référence	X	X	R0	X	X	X	Liaison à 6 degrés de liberté

*Voir Figure 24

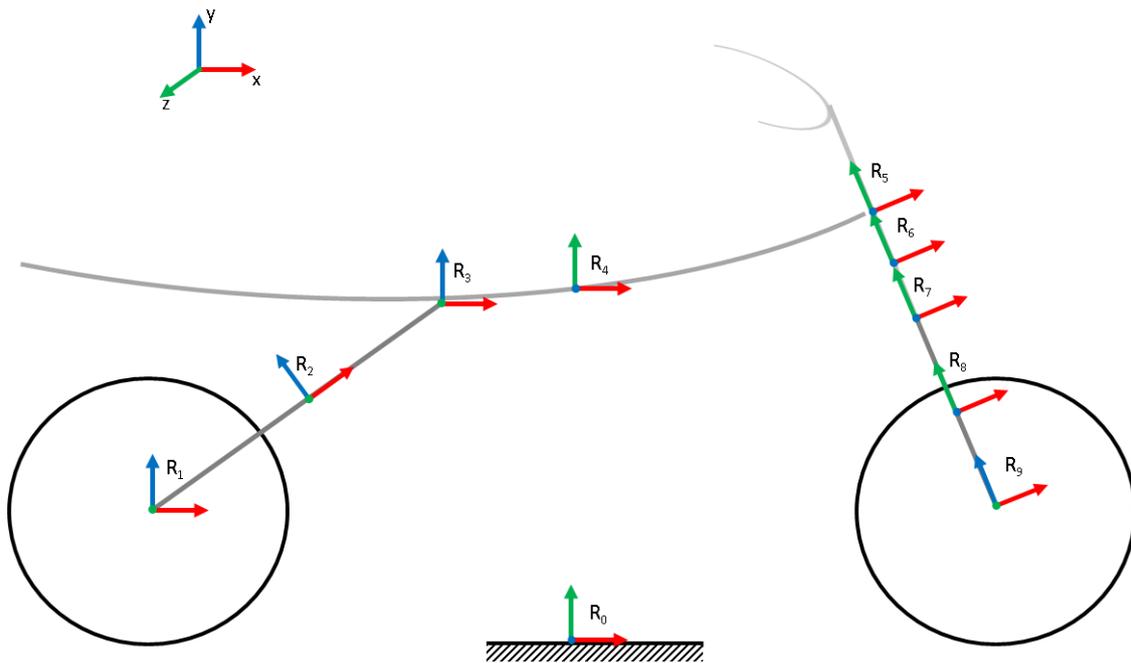


Figure 27 Positionnement des repères

Une fois la simulation terminée, le modèle est capable de proposer plus de trois cent cinquante paramètres de sortie. Il est possible de connaître au cours du temps la position cartésienne et angulaire de chaque corps ainsi que les vitesses et accélérations, la force de traction ou de freinage nécessaire à mouvoir le véhicule. De plus pour chaque pneu, après simulation, les forces longitudinale, transversale et verticale ainsi que les moments autour des trois axes sont connus. Des données propres à la déformation du pneumatique comme sa déflexion, son déport, ses longueurs de relaxation sont également connues. A cela s'ajoutent des données telles que la dérive, l'angle de dérive et la distance parcourue.

2. Gestion des entrées du modèle.

Le modèle est piloté par la variation de la position du guidon afin de définir sa trajectoire et la variation de sa vitesse pour contrôler son allure (FC3). Pour gérer la trajectoire du véhicule, nous avons choisi d'appliquer un couple sur la liaison pivot située entre le guidon et le châssis. Cela permet un guidage plus précis qu'avec l'angle guidon par exemple, puisque les plages de valeurs du couple sont plus importantes que celles de l'angle guidon. En ce qui concerne la gestion du déplacement du véhicule, la solution la plus simple serait de contrôler la vitesse du corps principal c'est-à-dire le châssis. Cependant, cela est difficile à mettre en

œuvre car il est uniquement possible d'appliquer une force ou un couple sur un corps ou une liaison. La solution que nous avons retenue pour parer à ce problème est d'exercer une force positive sur le centre de la roue arrière en cas d'accélération et négative sur le centre de la roue avant et/ou arrière en cas de freinage. Cette force doit être calibrée afin de contrôler au mieux la vitesse désirée. Dans le but d'éviter de grandes oscillations lorsqu'il y a peu d'écart entre la vitesse du châssis et la vitesse désirée, la force de traction F est proportionnelle à cet écart de vitesse Δ_V avec :

$$\Delta_V = V_{consigne} - V_{châssis} \quad (23)$$

Le principe de fonctionnement de l'algorithme de régulation de vitesse est défini Figure 28. La force de traction F est calculée comme suit :

$$F = \pm k \times \Delta_V \quad (24)$$

avec k un facteur non constant

Le facteur k a été déterminé à l'issu de nombreuses simulations et est calibré de sorte que l'accélération et la décélération maximale du véhicule ne dépasse pas respectivement 7m/s^2 et -10m/s^2 et ce, qu'importe l'écart de vitesse.

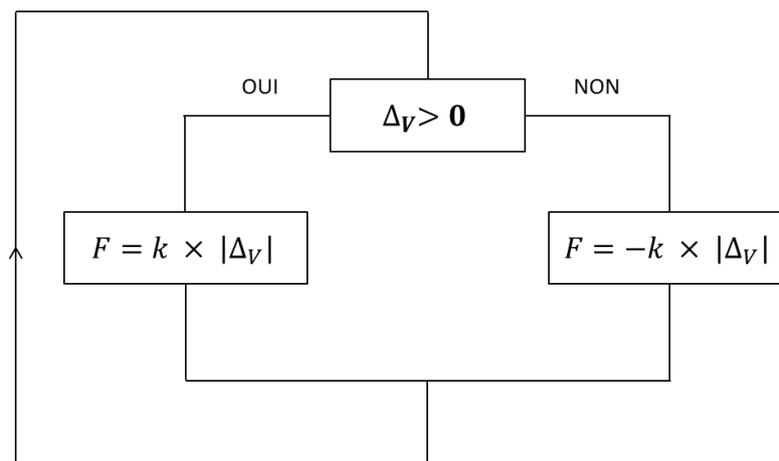


Figure 28 Régulation de vitesse

IV. Conclusion

Pour conclure, suite à une étude bibliographique étendue, nous avons fait des choix de modélisation afin de développer un modèle de deux-roues motorisé capable de simuler des manœuvres d'urgence et des pertes de contrôle à des fins de reconstruction d'accidents. Ce modèle est basé sur la théorie de la mécanique multicorps et est composé de six corps, chacun caractérisé par une masse, une inertie et la position de son centre de gravité. Le mouvement de ces différents corps est contraint par des degrés de liberté judicieusement choisis. Ils sont au nombre de onze sachant que six d'entre eux permettent au châssis d'avoir une complète liberté de mouvement dans l'espace. L'effet des suspensions a été pris en compte car elles jouent un rôle primordial dans la stabilité du véhicule. Afin de permettre une étude des pertes d'adhérence, un modèle de pneu a été implémenté. Le choix s'est tourné vers un modèle de Pacejka issu de sa célèbre Formule Magique. Ce modèle est adapté au deux-roues motorisé puisqu'il tolère des angles d'inclinaisons importants. Afin de pouvoir réaliser des simulations, le modèle précédemment développé a été implémenté avec un logiciel dédié à cet usage. L'outil utilisé est un module de Matlab/Simulink, appelé SimMechanics, développé par la société Mathworks. Nous nous sommes tournés vers ce logiciel pour ses capacités de compatibilité avec Matlab qui est utilisé pour les phases de pré et post simulation. Certains problèmes de modélisation se sont posés, notamment en termes de gestion de l'allure du véhicule. Nous avons donc développé et validé une méthode de calcul de la force de traction nécessaire à la mise en mouvement du véhicule.

Le modèle développé est pilotable en vitesse et en trajectoire, il reste alors l'étape cruciale de la validation

Chapitre 3

Validation du modèle

Identification des paramètres dynamiques d'un deux-roues motorisé pour les manœuvres d'urgences

“

La validation est une opération destinée à démontrer, preuves à l'appui, qu'une procédure, une prédiction ou une activité conduit effectivement aux résultats escomptés.

”

Ce chapitre a deux grands objectifs, la validation du modèle et la définition d'un incident. Il peut être scindé en quatre parties. La première porte sur l'instrumentation de la moto expérimentale que nous avons réalisé pour effectuer l'étape de la validation, la deuxième sur la présentation de la campagne d'essais. Dans un troisième temps nous aborderons la validation du modèle développé précédemment sur des manœuvres où la sollicitation augmente crescendo et pour terminer nous traiterons de la détection d'un incident au sens dynamique du véhicule. Pour répondre à ces deux objectifs, des essais expérimentaux sur route ouverte et sur piste ont été menés à l'aide de notre moto instrumentée.

I. Méthodologie pour la validation.

Dans ce paragraphe il est important de garder à l'esprit que l'objectif est de valider le modèle lors de manœuvres d'urgences. Pour cela il est important de se demander sur quels types de manœuvres nous souhaitons valider le modèle, quels sont donc les essais à réaliser et quels capteurs sont nécessaires pour enregistrer les paramètres dynamiques de la moto. Le Tableau 6 dresse un récapitulatif de nos besoins.

Tableau 6 Récapitulatif des besoins pour la validation du modèle

Quelles manœuvres ?		A quelle vitesse?
Conduite classique sur route	Virage	90 km/h
Représentatives d'actions extrêmes réalisées sur la route et pouvant mener à un accident	Evitement Freinage	Entre 30 km/h et Vmax* Entre 30 et 90 km/h
Permettant de solliciter fortement la dynamique du véhicule	Slaloms	Entre 30 km/h et Vmax*
Quels capteurs ?		Sur quelle plage?
Mesurer les entrées du modèle sur le guidon	Couplemètre	± 50 N.m
Mesurer les entrées du modèle en vitesse	Capteur à effet Hall	0 à 200 km/h
Mesurer les paramètres propres à la dynamique du véhicule		
Angle guidon	Couplemètre	± 30°
Angle d'inclinaison	Télémètre laser	± 70°
Roulis, lacet, tangage	Gyromètre	± 2000 deg.s-1
Accélération	Accéléromètre	±9.6 m.s-2
Trajectoire	GPS centimétrique	

* Vmax : vitesse maximale de passage jugée par le conducteur

Une fois nos besoins évalués, nous pouvons envisager une instrumentation complète du véhicule expérimental ainsi qu'un protocole pour les essais.

II. Présentation de la moto instrumentée.

La moto dont dispose le LMA est une Honda VFR 800. Cette dernière a été fournie par le LEPSIS (Laboratoire Exploitation, Perception, Simulateurs et Simulations) de l'IFSTTAR. Cette moto avait été instrumentée dans le but d'étudier le comportement du conducteur. Les capteurs présents permettaient de mesurer l'angle guidon, la présence d'un freinage, la vitesse des roues et l'ouverture des gaz. De plus, une centrale inertielle tri-axes était installée sur le réservoir ainsi que plusieurs caméras permettant de filmer l'environnement. Cette instrumentation n'était pas suffisamment complète pour une étude concernant la dynamique du deux-roues motorisé, c'est pour cela qu'elle a été approfondie. En effet, elle ne mesurait pas l'angle de roulis ni le couple appliqué par le conducteur sur le guidon or ces informations sont cruciales pour nos travaux.

Nous avons donc installé plusieurs nouveaux capteurs et développé une carte d'acquisition afin de compléter l'instrumentation et rendre notre moto opérationnelle pour une étude de la

dynamique de la moto. Après notre nouvelle instrumentation (Figure 29), plus de vingt signaux sont acquis à une fréquence de 100 Hz.

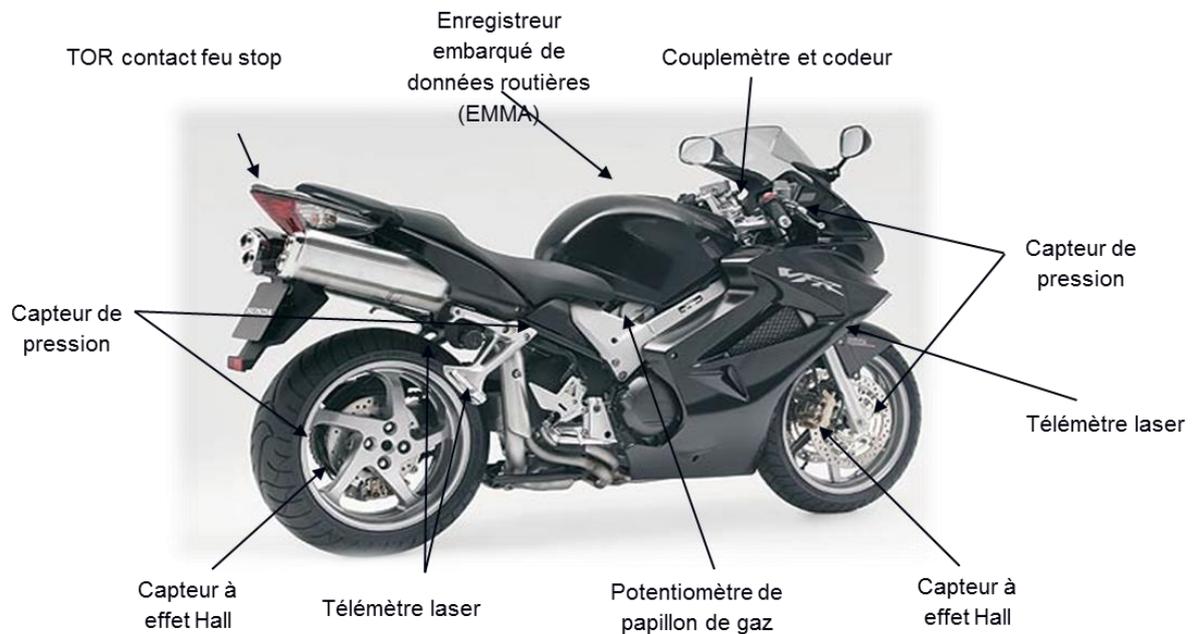


Figure 29 Vue d'ensemble des différents capteurs qui équipent la moto

Toutes les données acquises lors d'essais expérimentaux sont listés dans le Tableau 7, ainsi que la technologie permettant l'acquisition et l'unité de la mesure.

Par la suite, une présentation de chaque capteur qui équipe la Honda VFR 800 sera faite.

Tableau 7 Données acquises avec la moto instrumentée

Quantité mesurée	Technologie	Unité
Angle guidon	Capteur de couple	deg
Angle d'inclinaison	Télémètre laser	deg
Vitesse	Capteur à effet Hall	km.h ⁻¹
Roulis	Gyromètre	deg.s ⁻¹
Lacet	Gyromètre	deg.s ⁻¹
Tangage	Gyromètre	deg.s ⁻¹
Accélération	Accéléromètre	m.s ⁻²
Freinage	TOR	O/N
Gaz	Potentiomètre	0 à 100%
Pression de freinage	Capteur de pression	bar
Couple de direction	Capteur de couple	N.m
Vidéo	Caméra	
Débattement de suspension	Télémètre laser	cm
Trajectoire	GPS centimétrique	

1. Mesure de l'angle d'inclinaison

L'angle d'inclinaison est déterminé en utilisant deux télémètres laser installés sur les cale-pieds passager de chaque côté de la moto comme présenté sur la Figure 30 (a). Le capteur projette un faisceau laser sur le sol, le déphasage entre l'émission et la réception est calculé ce qui détermine les distances $h1$ et $h2$ (Figure 30 (b)) entre l'émetteur (le capteur lui-même) et la cible (le sol). La distance l est connue et constante (Figure 30 (b)) et l'angle d'inclinaison Φ est défini comme suit :

$$\Phi = \tan^{-1}\left(\frac{h2 - h1}{l}\right) \quad (25)$$

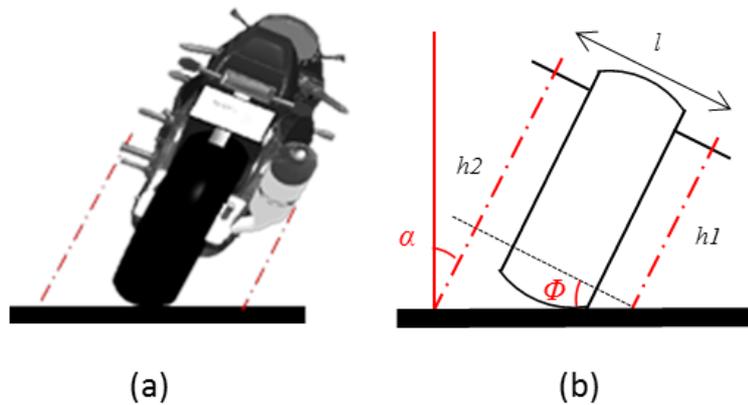


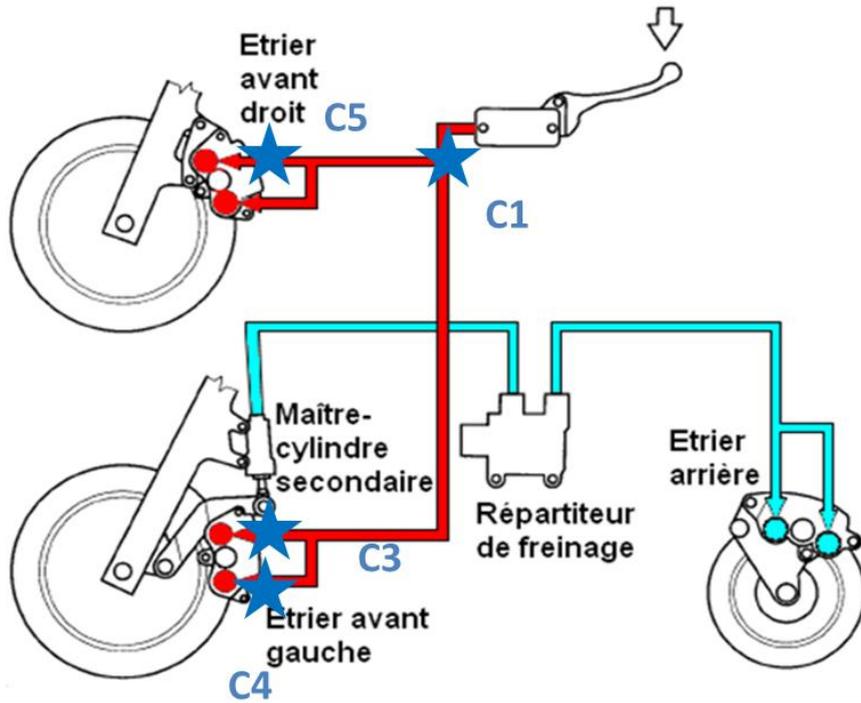
Figure 30 Schéma d'installation des télémètres lasers (a) et méthode de calcul de l'angle d'inclinaison (b)

2. Evaluation de la vitesse

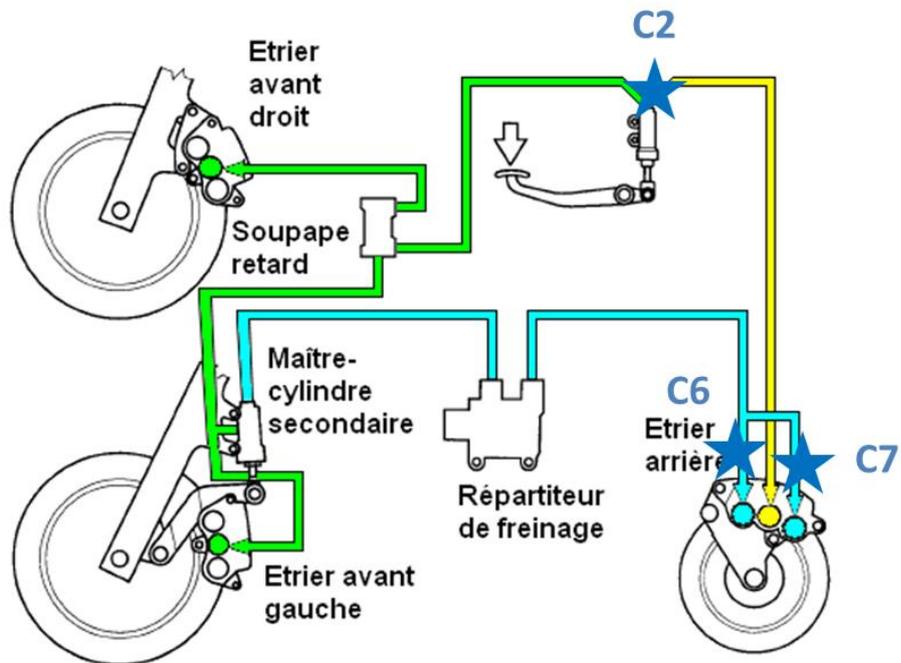
La vitesse globale du véhicule est mesurée via des capteurs à effet Hall placés sur chaque roue. Les capteurs installés sont les mêmes que ceux qui équipent le système ABS de la moto. Pour des raisons de sécurité, le système de mesure a été ajouté parallèlement au système existant pour être sûr de ne pas affecter le système de freinage.

3. Détection du freinage et de son intensité

Un capteur Tout Ou Rien (TOR) est branché sur le feu de stop à l'arrière de la moto. Le signal de capteur est récupéré mais l'information sur l'intensité du freinage est manquante. C'est pour cela que des capteurs de pression ont été intégrés précautionneusement au système de freinage. Toutefois, la Honda VFR 800 est équipée des systèmes de freinage ABS et Dual CBS. Ce dernier a pour but de répartir la pression de freinage entre les étriers avant et arrière. Plusieurs capteurs de pression ont donc été placés stratégiquement dans le but de caractériser la puissance du freinage mais aussi pour mieux comprendre le fonctionnement du Dual CBS, notamment les lois de répartition (Figure 31).



(a)



(b)

Position des capteurs de pression



Figure 31 Fonctionnement du Dual CBS en actionnant le frein avant (a) et le frein arrière (b)

4. Estimation des vitesses de roulis, lacet, tangage et des accélérations.

Au cours du projet S-Vrai [44], un enregistreur de données routières (Figure 32 (a)), appelée EMMA (Enregistreur eMbarqué de Mécanismes d'Accidents), a été développé par l'équipe Dynamique du Véhicule du LMA. Ce boîtier est capable d'enregistrer les données liées à la dynamique du véhicule [45] car il est équipé d'un accéléromètre tri-axes (saturation $\pm 9.6 \text{ m.s}^{-2}$), d'un gyromètre tri-axes (saturation $\pm 2000 \text{ deg.s}^{-1}$) et d'un accéléromètre de crash (saturation $\pm 1030 \text{ m.s}^{-2}$). Les données sont acquises à une fréquence de 100 Hz. La centrale inertielle est également équipée d'un module GPS disposant d'une fréquence d'acquisition de 10 Hz. L'enregistreur est installé sur le réservoir de la moto car il est important qu'il soit placé le plus près possible du centre de gravité comme on le voit sur la Figure 32 (b).



(a)



(b)

Figure 32 EMMA 3 (a) et enregistreur installé sur la moto (b)

5. Quantification du débattement de suspension

Les capteurs utilisés pour mesurer le débattement de suspension sont les mêmes que ceux utilisés pour déterminer l'angle d'inclinaison. A l'avant, le télémètre laser est placé sous le té inférieur de fourche et pointe une cible sur le garde-boue. A l'arrière, le capteur est positionné sous la boucle arrière et vise sur le bras oscillant.

6. Evaluation de l'ouverture des gaz

L'ouverture des gaz est mesurée directement avec le potentiomètre placé sur le papillon. Ce n'est pas un capteur qui est ajouté, il est présent sur la moto de série et le signal est récupéré.

7. Élément de contexte

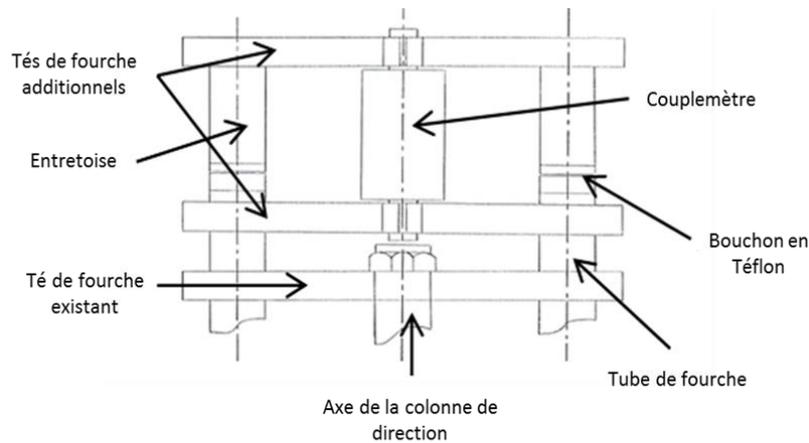
Une caméra est placée à l'avant de la moto dans l'axe du véhicule. Elle permet de contextualiser les données acquises. Elle pourrait également permettre après traitement de l'image de déterminer l'angle d'inclinaison de la moto en prenant pour référence la ligne d'horizon.

8. Estimation de la trajectoire

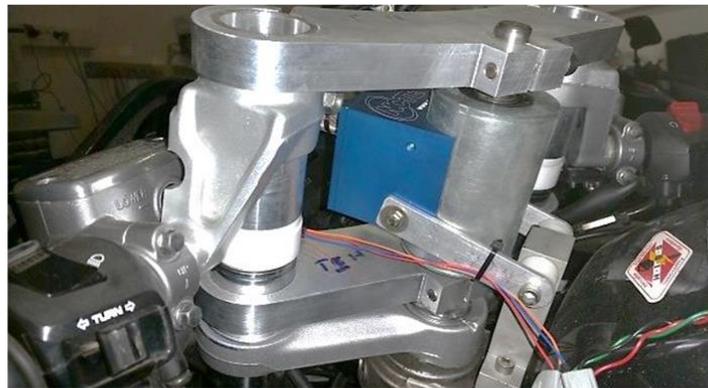
Dans le but d'enregistrer la position précise de la moto et donc de déterminer la trajectoire prise par le véhicule, un GPS centimétrique est utilisé (Leica Geosystems GS10/GS25). La base fixe est placée près de la piste où les essais sont réalisés et la base mobile est embarquée par le conducteur dans un sac à dos. La fréquence d'acquisition de ce GPS est 25 Hz.

9. Evaluation de l'angle guidon et du couple de direction

C'est un seul capteur (NCT Engineering Serie 3000) qui permet de mesurer à la fois l'angle formé par le guidon et le couple appliqué par le conducteur sur ce dernier. Le couplemètre est capable de mesurer sur des plages de valeurs allant de -50 à + 50 N.m pour le couple et de 0 à 360 ° pour l'angle guidon. L'installation de ce type de capteur est complexe, nous avons réfléchi à une solution technique permettant l'implantation de ce dernier sans pour autant altérer les commandes. Nous avons dû faire usiner des pièces supplémentaires et notamment des tés de fourche. Pour cela, nous avons réalisé des plans en 3D ainsi qu'un schéma de montage qui est présenté Figure 33 (a).



(a)



(b)

Figure 33 Plan de montage du couplemètre (a) et installation sur la moto (b)

Toutes les pièces ont été usinées dans de l'aluminium. Nous avons premièrement installé le té de fourche additionnel inférieur à la place du guidon. Les tubes de fourches sont couverts avec des bouchons en Téflon et des entretoises sont placées de chaque côté du couplemètre pour éviter les mouvements de flexion parasites. Ces dernières ont également été recouvertes de bouchons en Téflon pour limiter la friction avec les tubes de fourches. Les entretoises sont maintenues par un second té de fourche usiné et positionné au-dessus du couplemètre (té de fourche additionnel supérieur). Pour ne pas modifier la position du guidon, les demi-guidons sont retournés et assemblés au té additionnel supérieur par l'intermédiaire des entretoises. Grâce à ce montage, le couplemètre est maintenu entre deux tés de fourche additionnels et la rotation de son corps est bloquée par un support fixé sur le point d'ancrage du réservoir.

Après cette instrumentation assez complète, la moto est prête pour réaliser des essais expérimentaux visant à acquérir des données relatives à la dynamique du véhicule. Le but

de ces différents essais est de connaître d'un point de vue dynamique de la moto la fourchette des sollicitations appliquées sur le véhicule entre une situation de conduite dite normale et une manœuvre d'urgence. De plus, toutes les données acquises au cours de ces essais serviront à la validation du modèle.

III. Présentation de la campagne d'essais

Une fois la moto instrumentée, une campagne d'essais est menée. Le but de ces essais expérimentaux est d'acquérir des données propres à la dynamique du véhicule lors de fortes sollicitations. Ces données seront très utiles pour la validation du modèle développé.

Deux types d'essais ont été menés, des essais sur piste fermée et des essais sur route ouverte. Les essais sur piste ont pour but de réaliser des manœuvres d'urgences mais également des tours de circuit où la sollicitation du véhicule est importante. Les essais sur route ont pour objectif de caractériser d'un point de vue dynamique une situation de conduite normale.

Un protocole d'essais a été défini pour les différents types d'essais et est détaillé ci-dessous.

1. Essais sur piste

Des essais sur une piste fermée ont été réalisés sur le circuit du Mistral qui est une piste de karting située à Eyguières, proche du laboratoire. Concernant les deux-roues motorisé, il n'existe actuellement aucun parcours normalisé définissant les modalités d'essais expérimentaux. C'est pour cela que le choix a été fait de se baser sur les parcours à réaliser pour l'obtention du permis moto. Ce dernier a été revu [46] en 2013 et a été normalisé à toute l'Europe. Les tracés (parcours et distances normées) et vitesses des manœuvres d'évitement et slalom réalisées sont décrits ci-dessous.

a. Manœuvre de slalom

Les slaloms ont été réalisés avec une entrée à gauche et à droite sur le modèle de l'examen européen du permis de conduire (voir Figure 35). La vitesse de consigne à l'examen est de 40 km/h en 3^{ème}. La Figure 34 montre les images capturées en rafale lors des essais réalisés sur piste.



Figure 34 Fin de la séquence de slalom à gauche

Dans notre cas les essais ont été réalisés aux vitesses de 30 et 40 km/h ainsi qu'à la vitesse maximale jugée par le conducteur. Chaque passage aux différentes vitesses mentionnées ci-dessus a été répété trois fois. Des seuils magnétiques ont été placés sur le parcours, ils sont au nombre de deux, en entrée de parcours (A) et en sortie de parcours (B) comme indiqué sur la Figure 35. Au total 18 passages ont été réalisés.

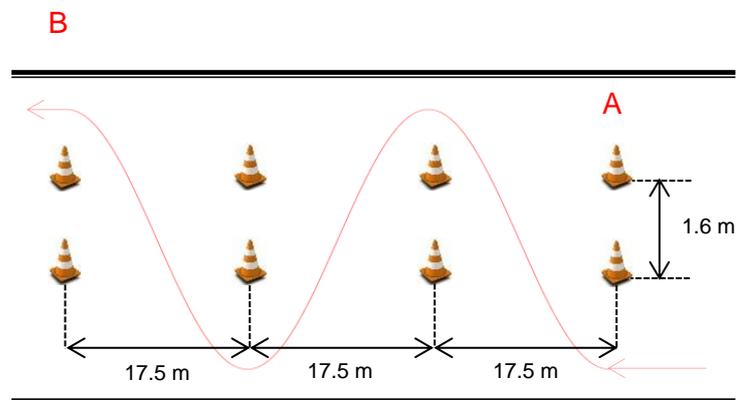


Figure 35 Slalom avec une entrée à gauche

b. Manœuvre d'évitement

Les évitements ont été réalisés avec une entrée à gauche et à droite sur le modèle de l'examen européen du permis de conduire (voir Figure 37). La vitesse de consigne à l'examen est de 50 km/h en 3^{ème}. La Figure 36 montre les images capturées en rafale lors des essais réalisés sur piste.



Figure 36 Séquence d'évitement à droite

Dans notre cas les essais ont été réalisés aux vitesses de 30 et 40 km/h et à la vitesse maximale jugée par le conducteur. Chaque passage aux différentes vitesses mentionnées ci-dessus a été répété 3 fois. Des seuils magnétiques ont été placés sur le parcours, ils sont au nombre de 2, en entrée de parcours (A) et en sortie de parcours (B) comme indiqué sur la Figure 37. Au total 18 passages ont été réalisés.

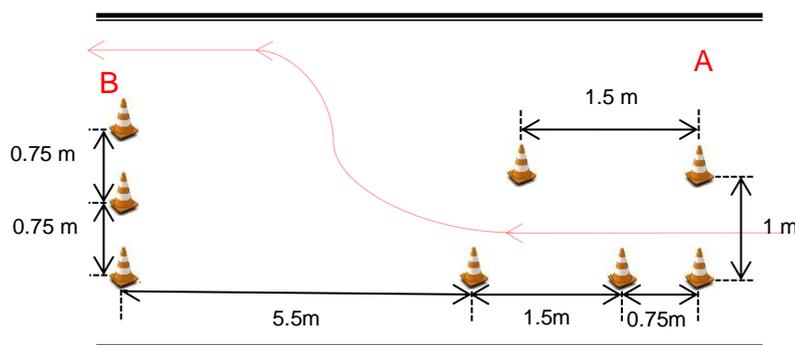


Figure 37 Evitement à droite

c. Essais de freinage

Des essais de freinages ont été réalisés à 30, 50, 70 et 90 km/h. Le conducteur avait pour consigne d'arrêter le plus rapidement possible le véhicule en actionnant uniquement le frein avant, ou uniquement le frein arrière ou les deux. Pour chacune des vitesses citées ci-dessus, les essais ont été réalisés à trois reprises. La Figure 38 représente les séquences de freinage photographiée lors des essais.

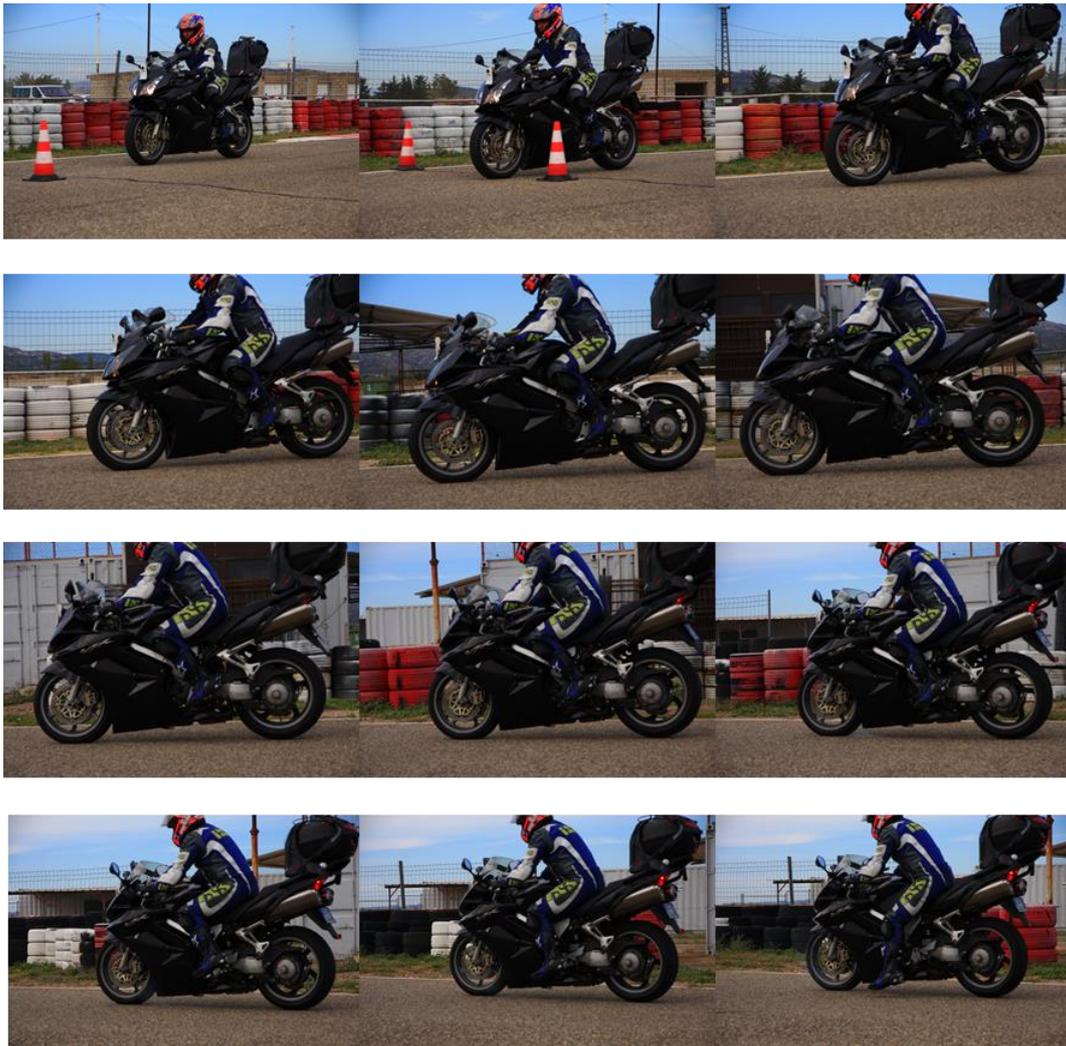


Figure 38 Séquence de freinage

Au total, 27 freinages ont été acquis. Un seuil magnétique était placé au point de déclenchement du freinage comme sur le repère (A) de la Figure 39.

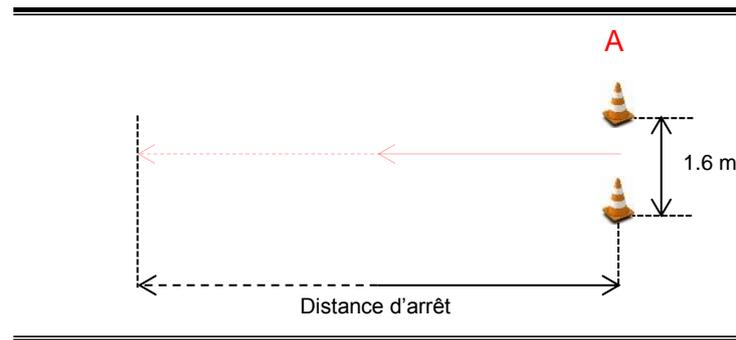


Figure 39 Essais de freinage

Des essais de freinage avec uniquement le frein moteur ont également été réalisés. On ne peut pas les catégoriser comme des manœuvres d'urgence mais ce sont des données intéressantes lorsque l'on s'intéresse à la dynamique de la moto et à la reconstruction d'accidents.

d. Essais de roulage

Des tours de piste ont été effectués à différentes vitesses. Le conducteur avait pour consigne de réaliser trois tours consécutifs à une vitesse constante de 30 km/h, puis trois tours en adoptant un niveau de sollicitations "moyen" tel qu'il est raisonnable de pratiquer sur la route et pour finir trois tours à un niveau de "fortes" sollicitations, c'est-à-dire jugé "maximal" par le conducteur sans tout de même prendre trop de risque. Le tracé du circuit est présenté sur la Figure 40.

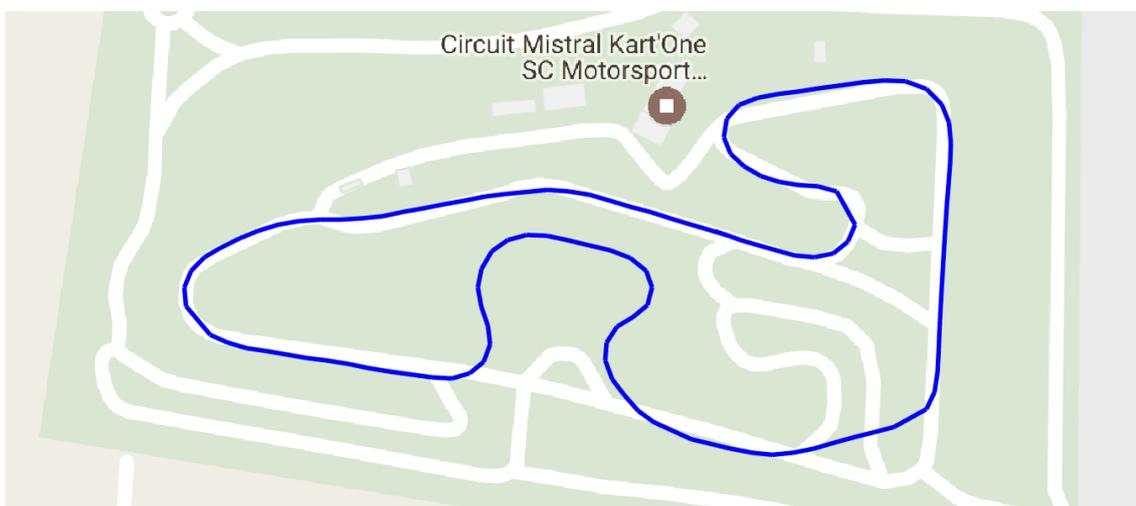


Figure 40 Tracé du circuit d'Eyguières



Figure 41 Essais de roulage

Dans le Tableau 8, un récapitulatif de toutes les manœuvres réalisées est présenté. Un total de 72 essais a été réalisé.

Tableau 8 Récapitulatif des essais réalisés sur piste

Manœuvre	Vitesse						Sollicitation moyenne	Sollicitation forte
	30 km/h	40 km/h	Vmax	50 km/h	70 km/h	90 km/h		
Slalom	G&D 3 fois	G&D 3 fois	G&D 3 fois	X	X	X	X	X
Evitement	G&D 3 fois	G&D 3 fois	G&D 3 fois	X	X	X	X	X
Freinage	Av & Ar 3 fois	X	X	Av & Ar Av Ar 3 fois	Av & Ar Av Ar 3 fois	Av & Ar Av Ar 3 fois	X	X
Frein moteur					3 fois			
Roulage	3 tours	X	X	X	X	X	3 tours	3 tours

G : entrée à gauche

D : entrée à droite

3 fois : chaque manœuvre est répétée 3 fois

Av : le conducteur actionne le frein avant

Ar : le conducteur actionne le frein arrière

Av & Ar : le conducteur actionne le frein avant et arrière

2. Essais sur route ouverte

Des essais sur route ouverte ont aussi été menés (environ 80 kilomètres). Le conducteur avait pour consigne de rouler normalement en respectant le code de la route. Plusieurs

parcours ont été enregistrés, ils étaient composé d'un mélange de milieu urbain et péri-urbain.



Figure 42 Trace GPS de quelques essais sur route

Une fois la moto instrumentée et la campagne d'essais réalisée, les données issues de cette dernière ont été traitées afin d'être utilisées pour la validation du modèle.

IV. Validation du modèle

Un modèle multicorps de deux-roues motorisé a été développé précédemment, il prend en compte les spécificités de la reconstruction d'accidents et doit donc être capable de reproduire des manœuvres d'urgence. Ces manœuvres d'urgence ont été réalisées à l'aide d'une moto instrumentée et les données relatives aux actions du conducteur et à la dynamique du véhicule ont été acquises. Ces dernières permettent de valider le modèle puisque certaines d'entre elles seront directement injectées comme entrées et d'autres serviront de comparaison aux résultats obtenus par simulation.

Pour fonctionner, le modèle a besoin comme entrées de la vitesse et du couple appliqué par le conducteur sur le guidon. Ces données sont directement issues de l'acquisition et injectées dans le modèle. Pour comparer les résultats de la simulation et de l'acquisition, les trajectoires, angles guidon et angles de roulis sont comparés pour des manœuvres transversales. Pour les manœuvres longitudinales, les courbes de vitesses de roues

acquises et simulées sont comparées. La vitesse étant une entrée du modèle nous ne vérifierons pas tant le profil de la courbe mais plutôt la capacité du modèle à reproduire les blocages de roues.

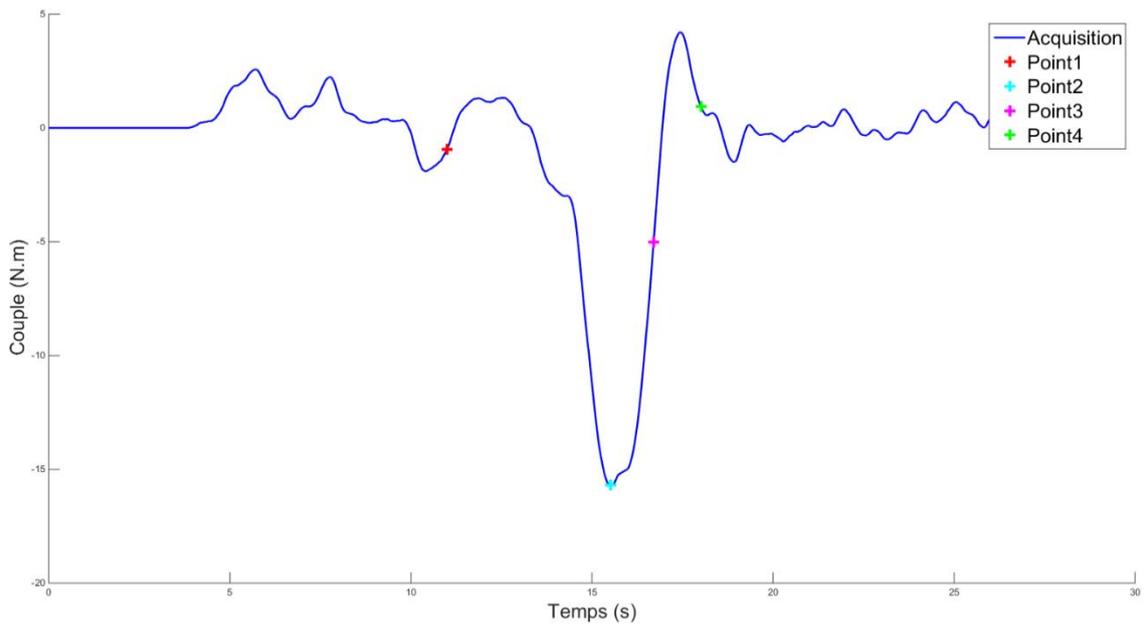
1. Validation sur un virage sur route ouverte

Nous avons choisi de commencer l'étape de validation du modèle numérique avec une manœuvre simple. Nous avons sélectionné un virage avec un grand rayon de courbure précédé et suivi d'une ligne droite. Les données d'entrée du modèle, le couple appliqué par le conducteur sur le guidon et la vitesse, ont été acquises lors des essais réalisés sur route ouverte avec la Honda VFR 800. Le passage a été effectué à une vitesse d'environ 90 km/h correspondant à une faible sollicitation, et les commandes du conducteur ont été réalisées de manière "souple" et bien décomposée.

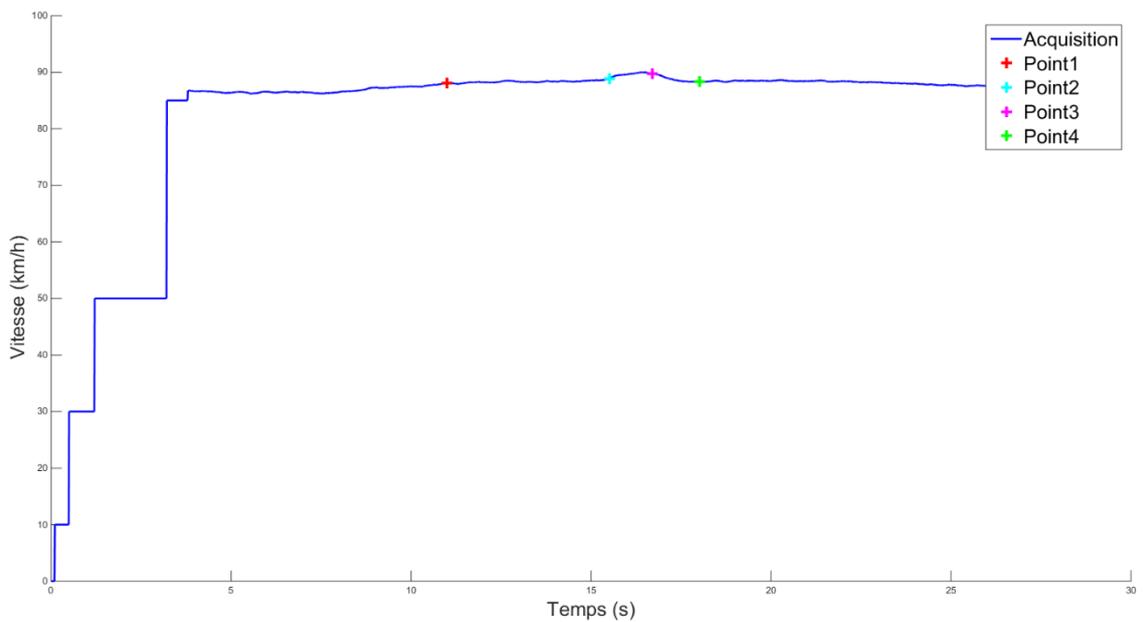
Les signaux d'entrée du modèle sont représentés sur la Figure 43. Les points de repère sont définis comme dans le Tableau 9.

Tableau 9 Répartition des points de repère pour la validation du modèle sur un virage simple

Points	Caractéristiques infrastructure	Caractéristiques dynamique
Point 1	Approche en ligne droite	
Point 2	Entrée du virage	Couple maxi Mise sur l'angle
Point 3	Courbure maximale	Angle de roulis maxi
Point 4	Sortie de virage en ligne droite	



(a)



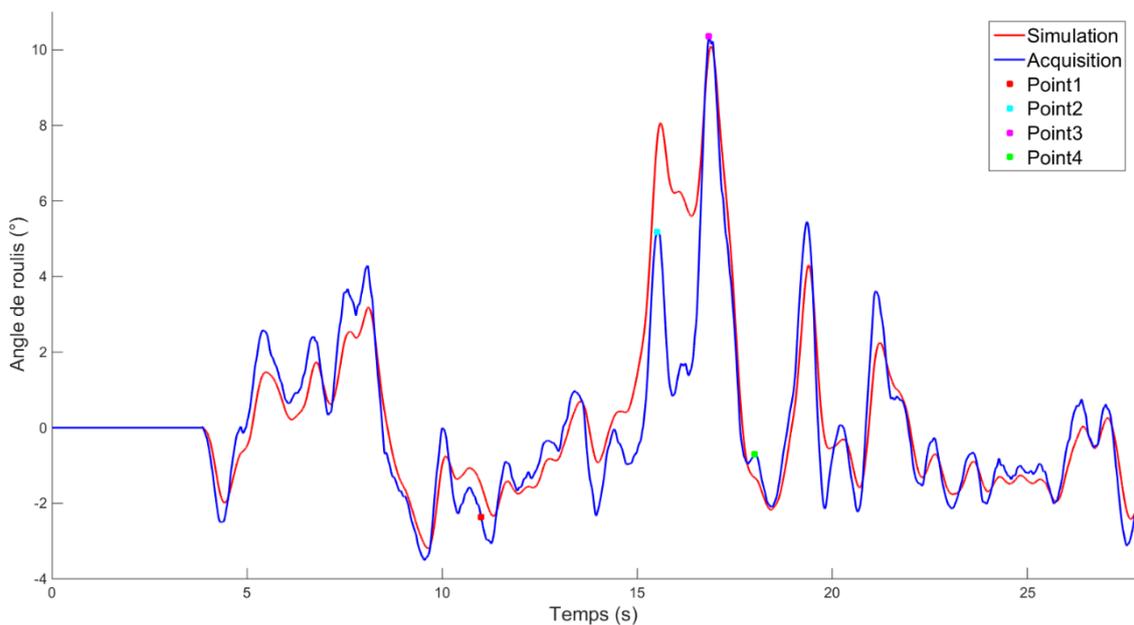
(b)

Figure 43 Signaux d'entrée, couple (a) et vitesse (b), pour la validation sur un virage simple

La trajectoire ainsi que l'angle de roulis acquis et simulé sont représentés Figure 44.



(a)



(b)

Figure 44 Trajectoire (a) et angle de roulis (b) acquis et simulé pour la validation dans un virage simple

Quatre points ont été placés afin de pouvoir se repérer dans les signaux acquis et simulés. Nous avons placé le premier point avant le virage, nous observons un couple de -0.9 N.m , une vitesse de 88 km/h , un angle de roulis acquis de -2.3° . Le deuxième point a été placé à l'entrée du virage, le couple mesuré est de -15.6 N.m , la vitesse de 88.9 km/h et l'angle de roulis de 5.1° . Le troisième point a été choisi en plein milieu du virage, nous avons relevé un couple de -5 N.m , une vitesse de 89.7 km/h et un angle de roulis de 16.7° . Le quatrième

point, en sortie de virage indique un couple de 0.9 N.m, une vitesse de 88.3 km/h et un angle de roulis de -0.7°. L'ensemble de ces valeurs est rassemblé dans le Tableau 10.

Tableau 10 Paramètres dynamiques relevés lors de la validation dans un virage simple

Point	1	2	3	4
Situation	Avant virage	Entrée virage	Virage	Sortie virage
Couple (N.m)	-0,9	-15,6	-5	0,9
Vitesse (km/h)	88	88,9	89,7	88,3
Angle de roulis (°)	Mesuré	-2,3	5,1	16,7
	Simulé	-1,5	7,4	16,7

On peut noter que le couple maximum est au point n°2, c'est-à-dire en entrée de virage alors que l'angle de roulis maximum est au point n°3, en plein virage.

Comme on peut le voir sur l'ensemble des courbes présenté ci-dessus, le modèle est capable de simuler le franchissement d'un virage simple à large rayon de courbure. Nous allons maintenant pouvoir passer à la validation de ce dernier sur des manœuvres plus complexes et plus sollicitantes.

2. Validation sur des manœuvres longitudinales

Comme cela a été expliqué précédemment, la vitesse est une entrée du modèle. Or SimMechanics n'accepte pas directement une vitesse pour mouvoir un corps mais une force ou un couple (voir page 54). C'est pour cela que nous avons décidé d'appliquer une force proportionnelle à l'écart entre la vitesse du châssis lors de la simulation et la vitesse souhaitée. Le modèle doit également être capable de prendre en compte des blocages de roues lors de freinage intense. Comme nous l'avons vu précédemment (voir page 54), un couple négatif est appliqué sur les roues afin de les bloquer.

La validation du modèle pour des manœuvres longitudinales a deux objectifs :

- Vérifier que la méthode de calcul de la force de traction/freinage est correcte et adaptée aux caractéristiques techniques de la moto.
- Vérifier que la méthode utilisée pour reproduire des blocages de roues répond bien à nos attentes.

Pour valider la première partie que nous appellerons gestion de la vitesse, de simples démarrages et freinages sont simulés et comparés à des acquisitions. Pour la deuxième partie, des freinages d'urgences ont été réalisés à l'aide de la moto instrumentée. Ces derniers sont reproduits par simulation afin d'être comparés.

a. Gestion de la vitesse

Pour rappel, la force de traction/freinage est définie comme suit :

$$F = \pm k \times \Delta v$$

avec k un facteur constant

$$\Delta v = V_{consigne} - V_{châssis}$$
(26)

La difficulté est de définir la valeur prise par le facteur k . Pour cela, différentes simulations ont été menées afin de déterminer la valeur du coefficient qui permet d'atteindre le plus rapidement possible la vitesse souhaitée sans dépasser l'accélération maximale d'une Honda VFR 800, 7.5m/s^2 , indépendamment de la vitesse.

Les accélérations relevées lors des simulations sont consignés dans le Tableau 11.

Tableau 11 Accélérations associées au coefficient k

Vitesse (km/h)	Coefficient k	Accélération maximale (m/s ²)	Vitesse (km/h)	Coefficient k	Accélération maximale (m/s ²)
10	150	3,9	50	50	6
	200	4,9		60	7,2
	300	6,5		62	7,3
	400	7,7		63	7,6
	380	7,3	70	50	8,4
390	7,5	40		6,8	
15	240	7,6	45	7,7	
	230	7,3	44	7,4	
	235	7,5	90	30	6,5
130	6,4	35		7,8	
150	6,7	34		7,4	
20	180	8	110	24	6,4
	170	7,6		28	7,5
	169	7,7	130	25	7,9
	168	7,5		22	7
30	110	7,6	23	7,4	
	105	7,2	24	7,7	

	107	7,5		14	5,1
	108	7,6		18	5,8
	80	7,6	180	20	6,5
40	79	7,5		22	7
	78	7,4		23	7,4

On remarque que le coefficient k adapté à chaque vitesse (en gras dans le Tableau 11) varie en fonction de cette dernière. Nous avons donc réalisé une interpolation pour définir l'équation qui régit les variations de k en fonction de la vitesse (voir Figure 45).

L'équation obtenue est la suivante :

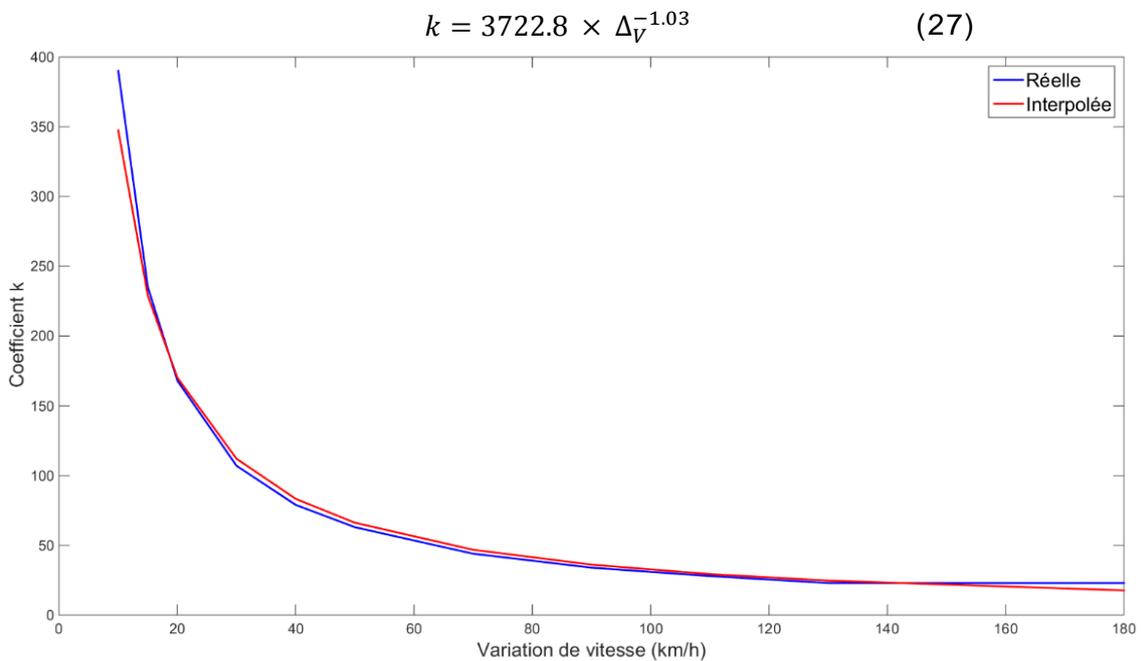
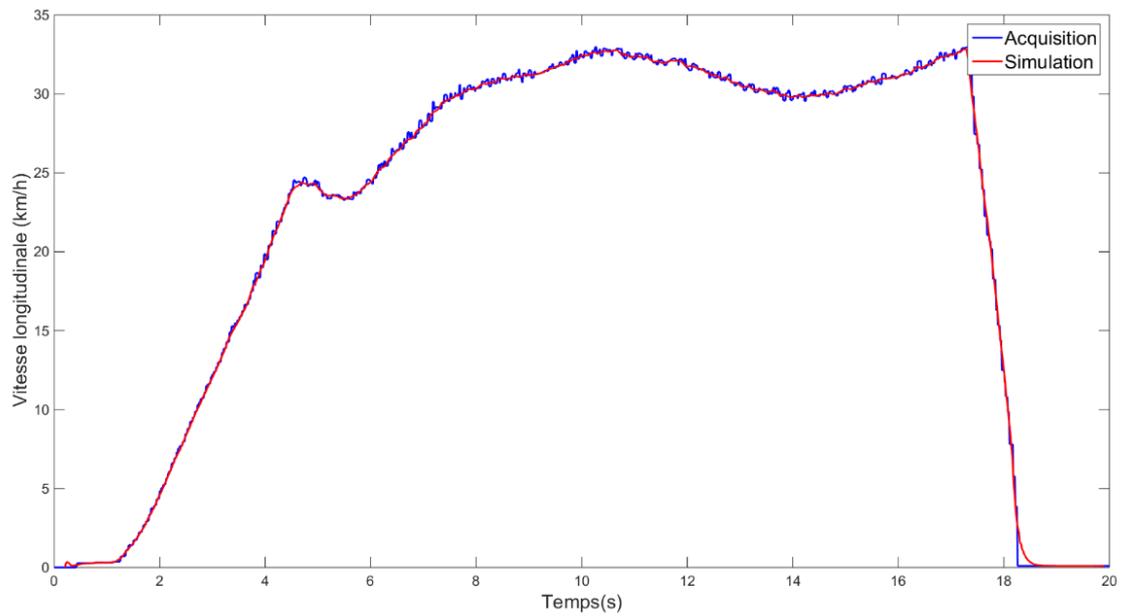
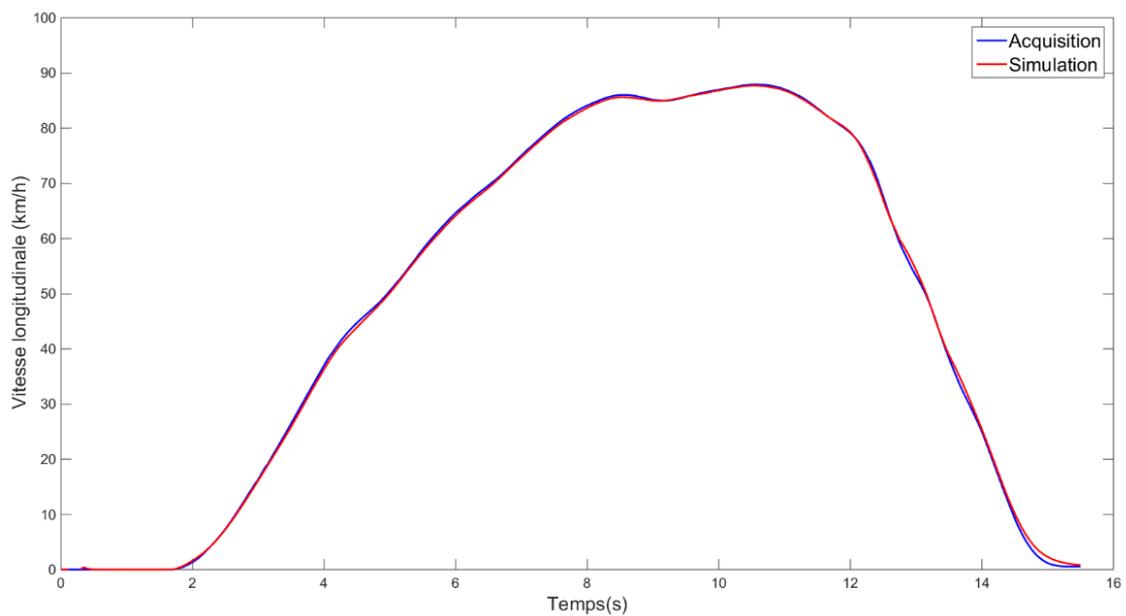


Figure 45 Variations de k en fonction de la variation de vitesse

Une fois l'équation implémentée dans le modèle, nous avons réalisé les simulations des freinages sans blocage de roues réalisés avec la moto.



(a)



(b)

Figure 46 Comparaison de la vitesse acquise et simulée à 30 km/h (a) et 90 km/h (b)

Comme on peut le voir sur la Figure 46 que ce soit à 30 ou à 90 km/h les courbes de vitesse acquise et simulée se superposent parfaitement. La méthode de gestion de la vitesse nous convient et est validée.

Les distances d'arrêt calculées et les décélérations moyennes sont consignées dans le Tableau 12.

Tableau 12 Récapitulatif des distances d'arrêt

Vitesse	Distance d'arrêt calculée (m)			Décélération moyenne (m/s ²)		
	Avant et arrière	Arrière	Avant	Avant et arrière	Arrière	Avant
30 km/h	4,5	X	X	-7,8	X	X
50 km/h	12,5	18,5	12,5	-7,7	-5,2	-7,7
70 km/h	25,5	43,0	24,9	-7,4	-4,4	-7,6
90 km/h	48,1	X	X	-6,5	X	X

En ce qui concerne le lâché de la poignée de gaz, les essais réalisés avec le 2^{ème} rapport enclenché ont révélé une décélération moyenne de -1.7 m/s² pour une vitesse de 65 km/h.

En accord avec les essais de freinages qui ont été réalisés, la distance nécessaire pour arrêter la moto à 30 km/h est de 4.5 mètres et la décélération moyenne est de 7.8 m/s². A la vitesse de 50 km/h, la distance d'arrêt est presque triplée puisqu'elle est de 12.5 mètres pour une décélération moyenne de 7.7 m/s². A 70 km/h, la distance d'arrêt a été calculé à 25.5 mètres et la décélération moyenne est de 7.4 m/s² alors qu'à 90 km/h la distance nécessaire pour arrêter la moto est de 48.1 mètres pour une décélération moyenne de 6.5 m/s². D'après les résultats issus des essais expérimentaux, lorsque la vitesse augmente, la distance nécessaire pour arrêter la moto augmente aussi alors que la décélération globale du véhicule diminue. Il faut noter que si les décélérations lorsque l'on freine de l'avant et de l'arrière ou que de l'avant sont semblables c'est à cause de l'effet du Dual CBS.

b. Gestion des blocages de roues

Afin que notre modèle soit le plus fidèle possible à la réalité, nous avons dû prendre en compte les problèmes de blocage de roue lors de freinage intense. Pour cela, nous venons appliquer un couple négatif sur la roue afin que la vitesse de cette dernière devienne nulle.

$$\text{Couple} = C \times \Delta_V$$

avec C un coefficient constant et

$$\Delta_V = V_{roue} - V_{consigne} \quad (28)$$

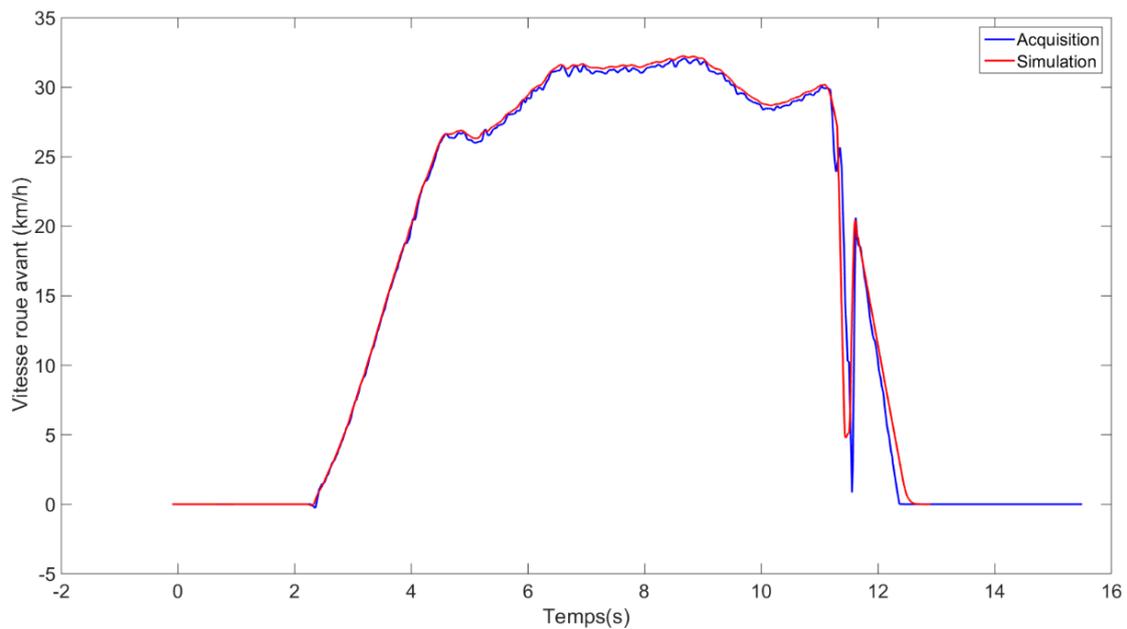
$$(V_{consigne} = 0$$

lors d'un blocage de roue)

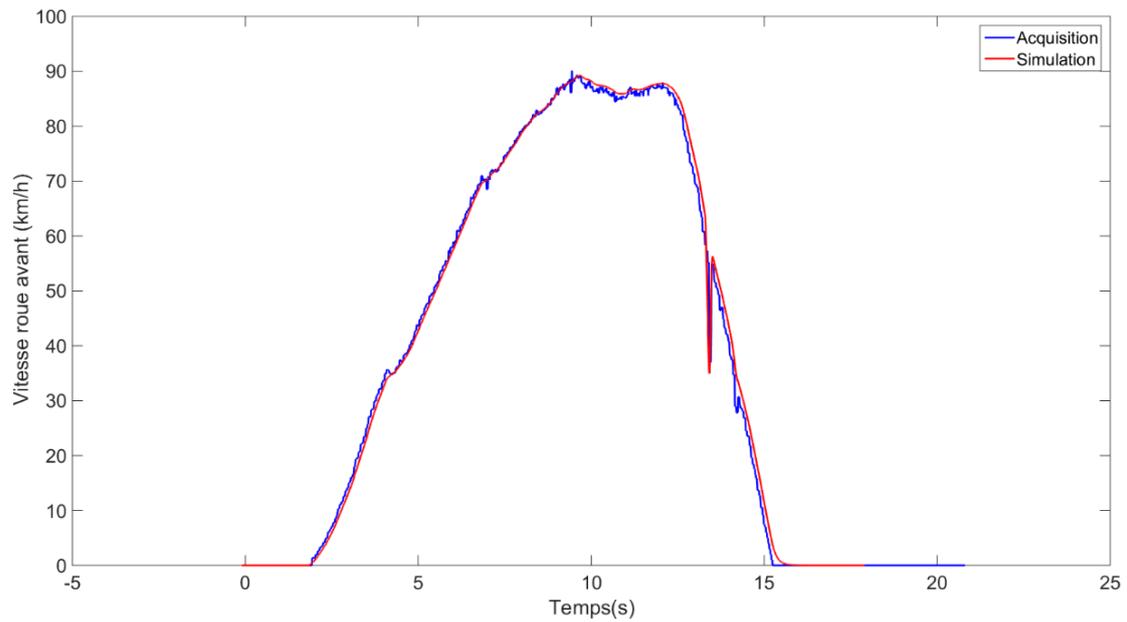
Lorsque l'utilisateur demande une décélération supérieure aux capacités de freinage de la moto, nous considérons que la roue avant se bloque et la vitesse globale du véhicule n'est plus gérée par la méthode présentée dans le paragraphe « a. Gestion de la vitesse », mais par la méthode ci-dessus.

Le coefficient C a été calibré de manière à respecter la décélération de la roue en fonction de sa vitesse initiale.

Sur la Figure 47 on peut observer les résultats obtenus lors de la simulation de freinage avec blocage de roue (déclenchement ABS) à 30km/h (a) et 90 km/h (b). Comme on peut le constater le modèle réagit bien à ce genre de sollicitations, particulièrement à vitesse élevée. On peut également noter que plus la vitesse augmente, plus la durée de blocage de la roue, dictée par l'ABS, est faible.



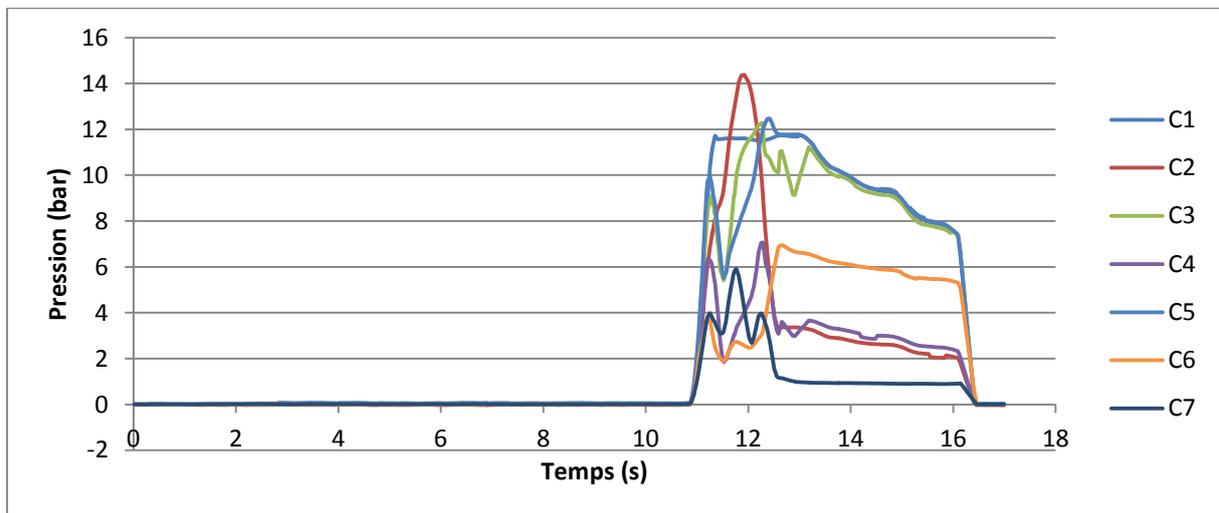
(a)



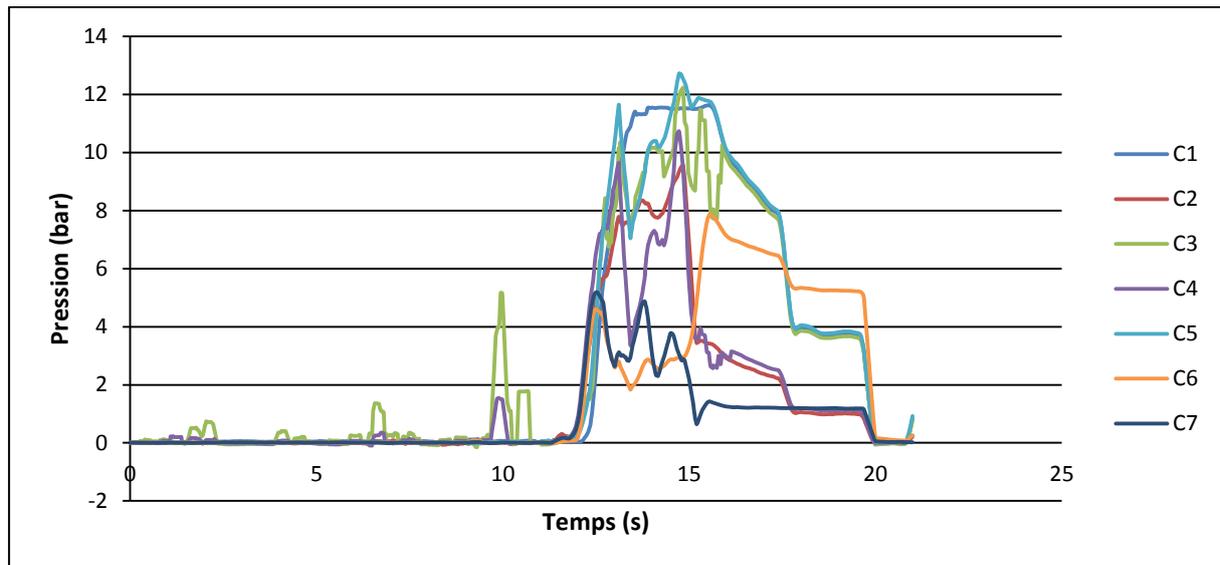
(b)

Figure 47 Blocage de roue à 30 et 90 km/h

De plus, les valeurs de pression dans le circuit de freinage enregistrées par les différents capteurs sont consignées dans la Figure 48.



(a)



(b)

Figure 48 Variations de la pression dans le circuit de freinage à 30 km/h (a) et 90 km/h (b)

Comme on peut le constater sur la Figure 48 (a), à 30 km/h le pic de pression maximum est d'environ 14 bar alors que le pic de pression minimum est de 6 bar. A 90 km/h, on constate un pic de pression maximum d'environ 12 bar alors que le minimum est d'environ 5 bar. L'évolution de la pression est donc inversement proportionnelle à la vitesse.

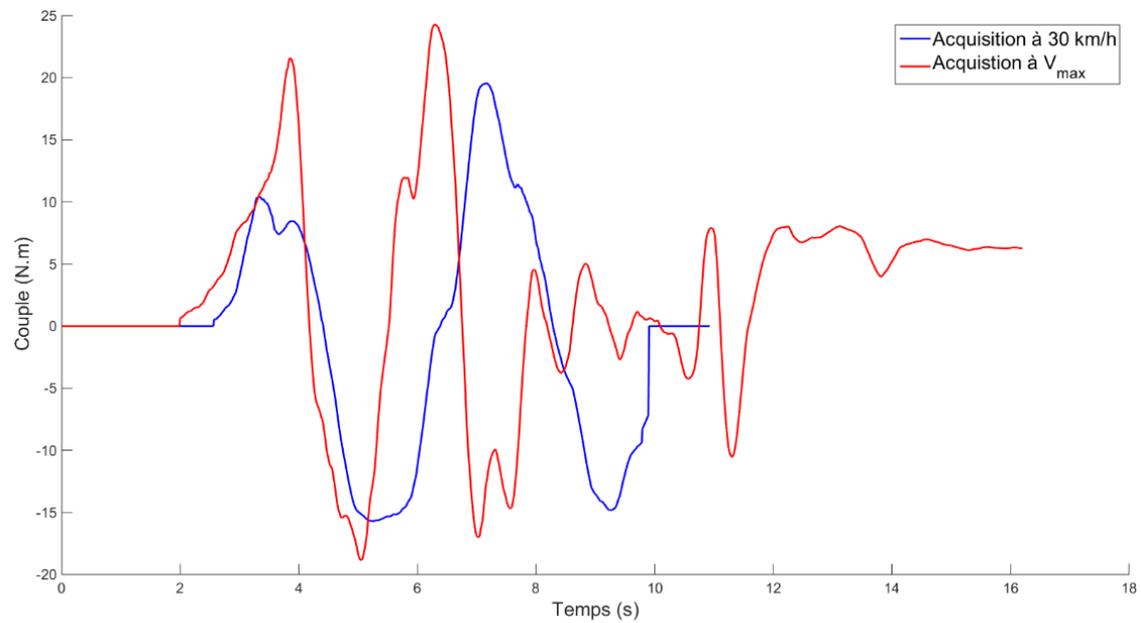
Ces résultats montrent que pour des manœuvres longitudinales, le modèle que nous avons développé au cours de cette thèse est valide et reste stable au cours de la simulation. En effet, ce dernier est capable de simuler des manœuvres d'urgence ; alors, lorsque la dynamique du véhicule est fortement sollicitée le pas de temps de la simulation est réduit afin de gérer au mieux les complications.

3. Validation sur des manœuvres transversales

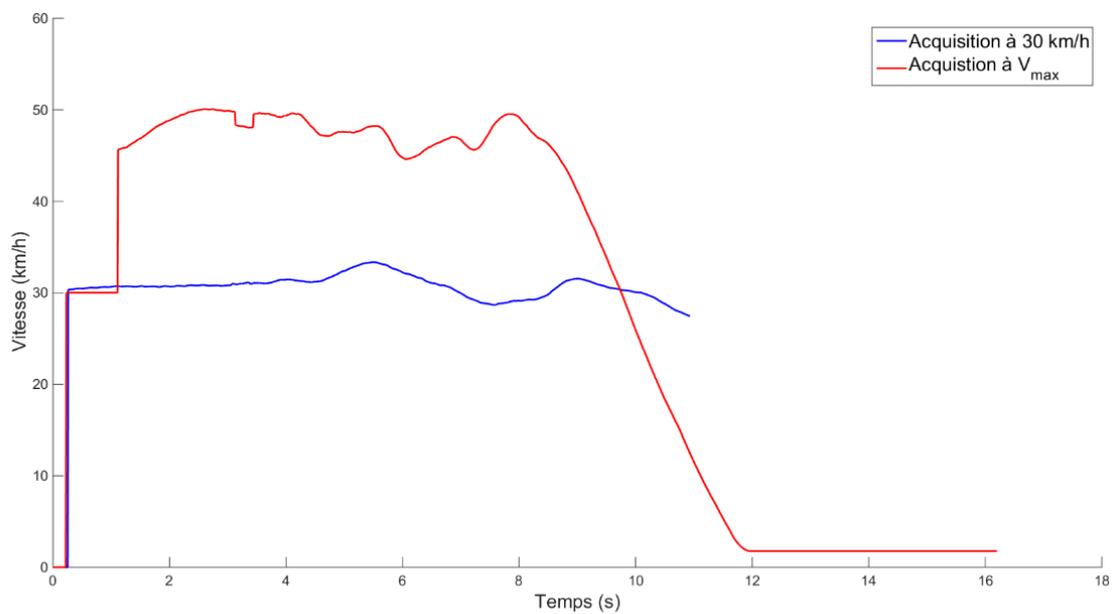
Pour valider le modèle sur une manœuvre de slalom ou d'évitement, la méthode est inchangée. Contrairement au freinage, l'entrée du couple exercé par le conducteur sur le guidon est ici primordiale. Différentes simulations à différentes vitesses ont été menées. Les résultats présentés sont ceux des simulations à 30 km/h et à la vitesse maximale jugée par le conducteur soit environ 50 km/h. Sur cette plage de vitesse, il est considéré que la majorité des manœuvres d'urgence sont balayées. En effet une étude précédente a montré que les accidents surviennent à une vitesse au choc moyenne de 37km/h [47].

a. Manœuvre de slalom

La vitesse de la moto et le couple appliqué par le conducteur sur le guidon sont injectés dans le modèle.



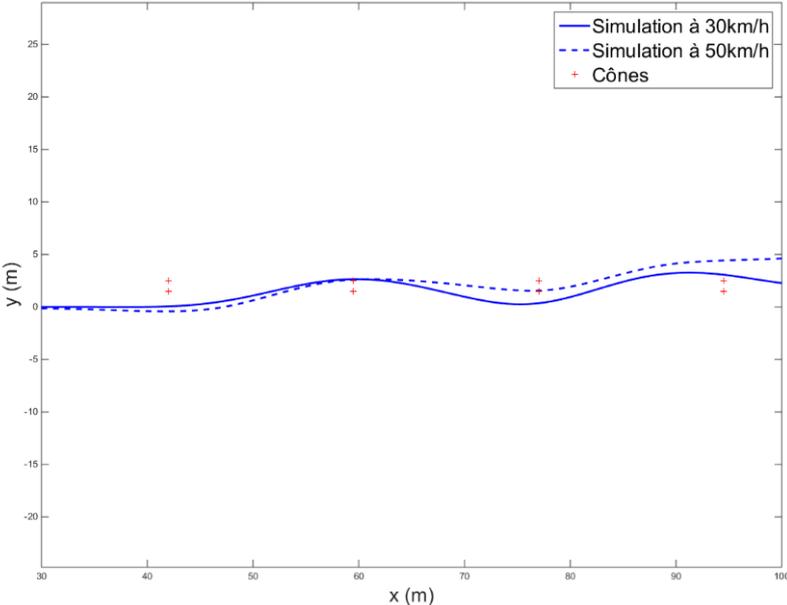
(a)



(b)

Figure 49 Inputs de couple (a) et de vitesse (b) pour un slalom à 30 km/h et à V_{max}

Afin de valider notre modèle, les trajectoires, angles de roulis et angles guidon sont comparés entre la simulation et l'acquisition.



(a)

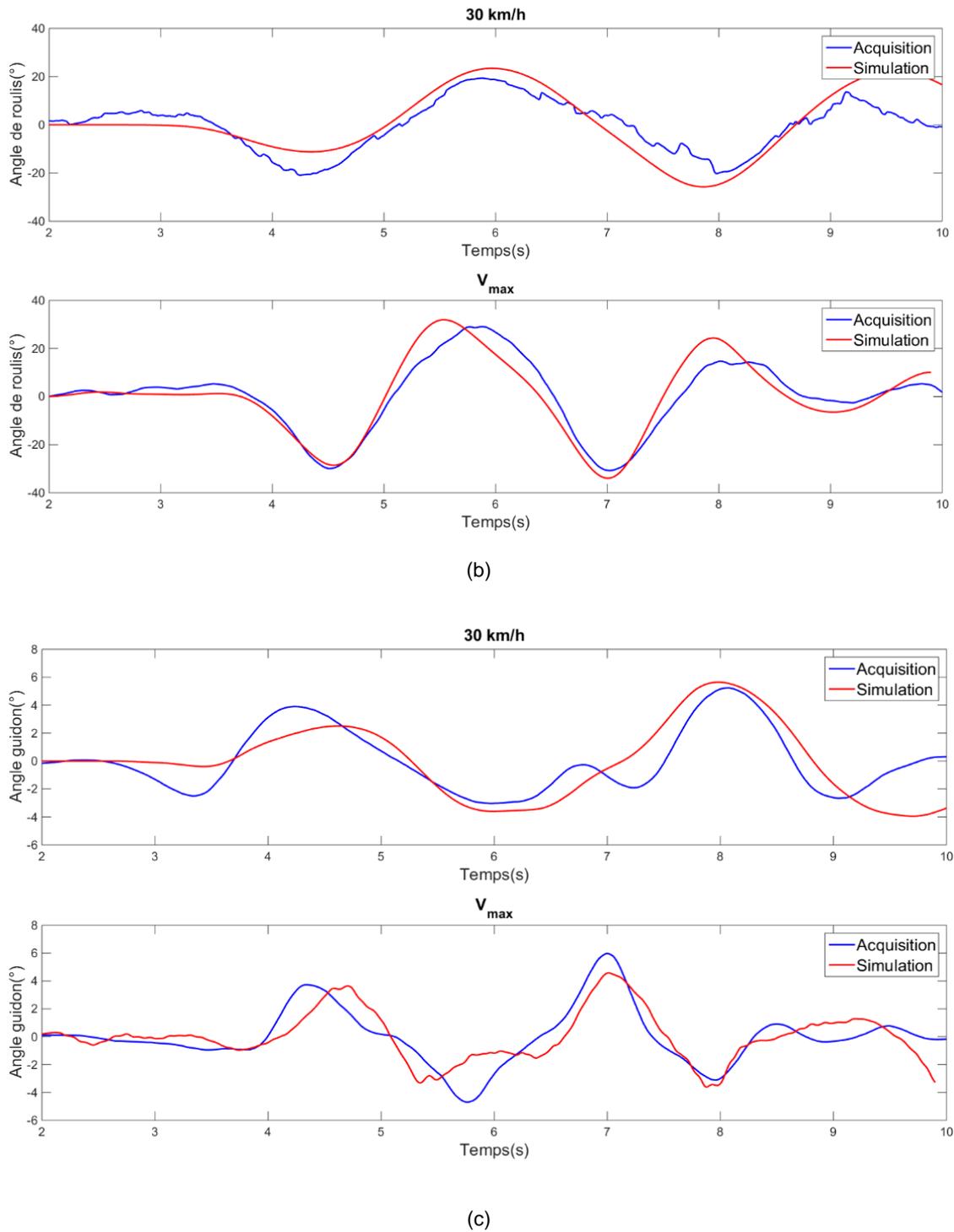


Figure 50 Comparaison des résultats issus de la simulation et de l'acquisition d'un slalom pour la trajectoire (a), l'angle de roulis (b) et l'angle guidon (c)

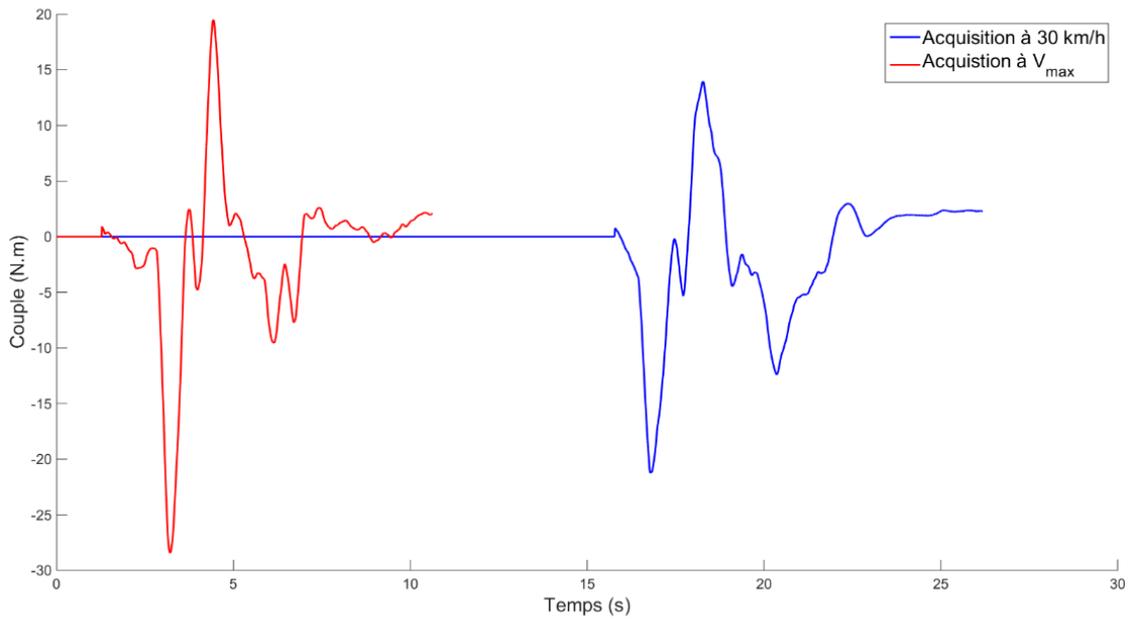
La Figure 50 (a) présente la trajectoire simulée pour un slalom aux vitesses de 30 et 50 km/h. A la vitesse de 30 km/h, le conducteur ayant plus de temps pour parcourir le slalom, la

trajectoire est plus fluide qu'à 50 km/h. On observe qu'à 30 ou 50 km/h le modèle est capable de reproduire un slalom réalisé à l'aide de la moto instrumentée. La Figure 50 (b) et (c) présente l'angle de roulis et l'angle guidon pour un slalom à 30 et 50 km/h obtenus avec le modèle et comparé à l'acquisition. De manière générale, le modèle a une meilleure réponse à 50 km/h qu'à 30 km/h. Les écarts les plus importants entre la simulation et l'acquisition se situent à la fin du slalom que ce soit pour l'angle guidon ou l'angle de roulis ainsi qu'à 30 ou 50 km/h. On peut constater que les variations de l'angle de roulis sont plus brutales à 50 km/h, en effet, l'augmentation de la vitesse engendre une diminution du temps disponible pour réaliser chaque contournement de cône.

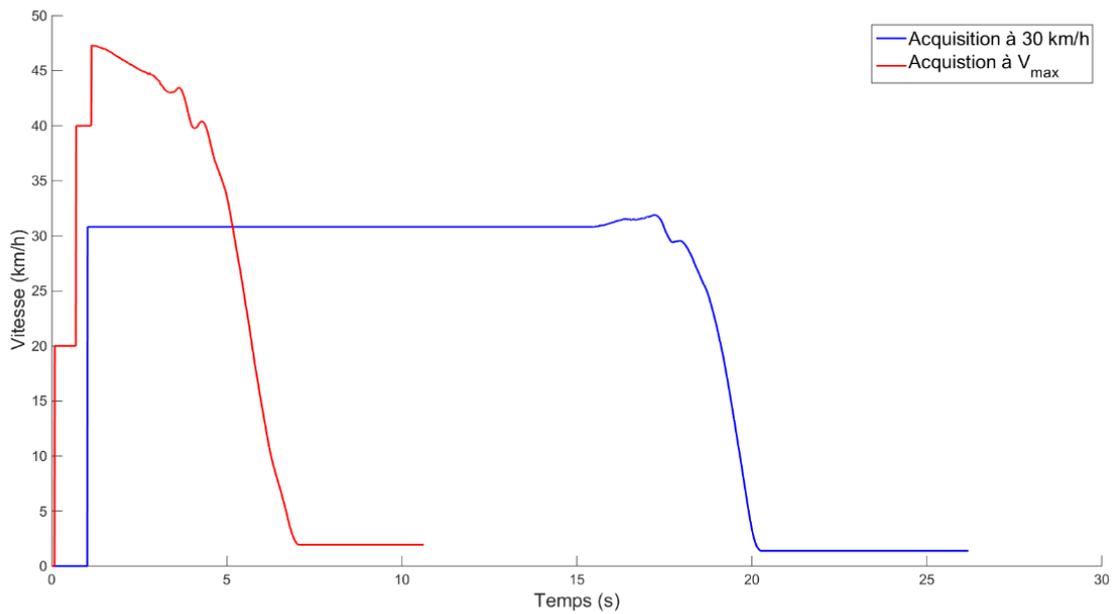
Pour un slalom à 30 km/h, l'angle guidon maximal acquis est de 5° (6° pour le simulé). Si le contournement de chaque cône est comparé, c'est le dernier qui est le plus sollicitant. Cela peut être expliqué par le fait que tout au long du slalom le conducteur accumule les contraintes de chaque changement de phases. Concernant l'angle de roulis, la valeur maximale acquise est 20 ° et 22° pour la simulation. Le premier et le dernier contournement sont moins sollicitant d'un point de vue de l'angle guidon car ils ne sont pas complets (ils correspondent à la sortie de la zone de slalom). Pour un slalom à 50 km/h, l'angle guidon maximal acquis est de 6° et environ 4° pour la simulation, et chaque contournement de plot est aussi sollicitant que les autres. En ce qui concerne l'angle de roulis, la valeur maximale acquise est de 30° (32° pour la simulation). On peut constater que le premier et le dernier cône sont moins sollicitants que les autres car le conducteur n'est pas contraint en entrée et en sortie.

b. Manœuvre d'évitement

La vitesse de la moto et le couple appliqué par le conducteur sur le guidon sont injectés dans le modèle.



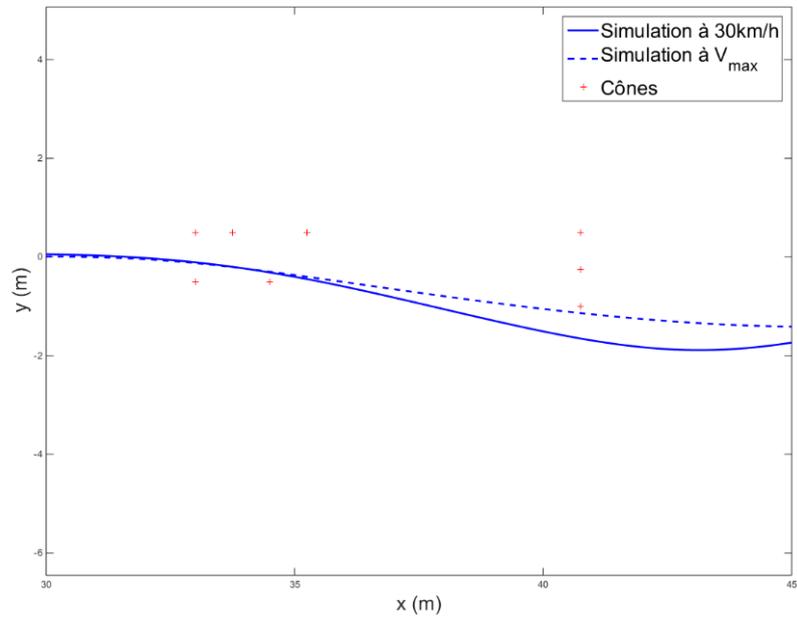
(a)



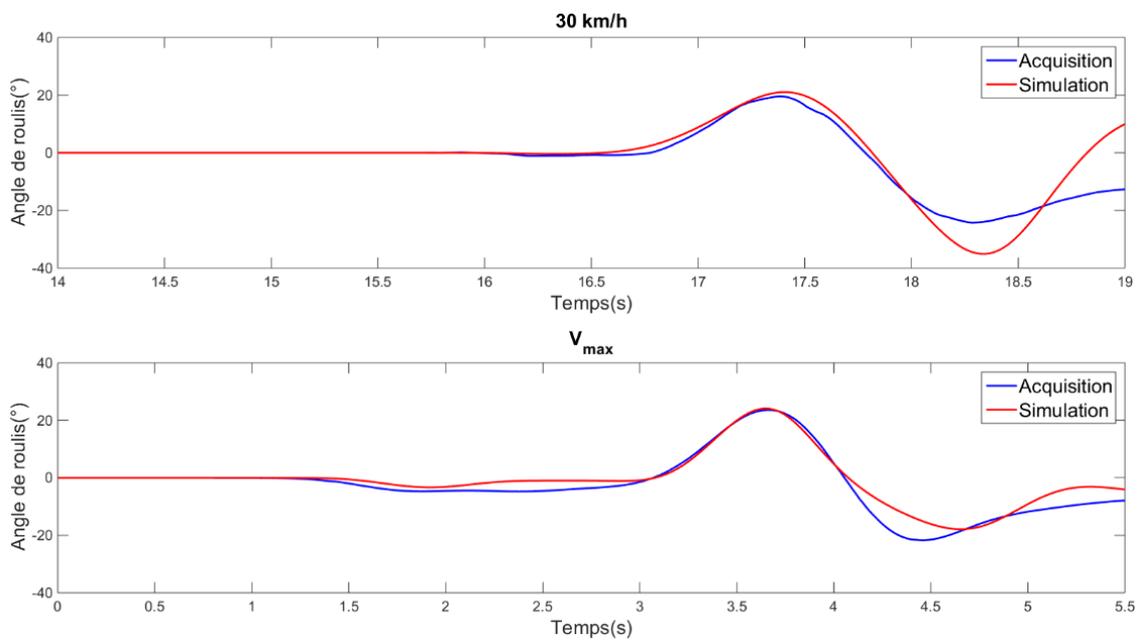
(b)

Figure 51 Inputs de couple (a) et de vitesse (b) pour un évitement à 30 km/h et V_{max}

Afin de valider notre modèle, les trajectoires, angles de roulis et angles guidon sont comparés entre la simulation et l'acquisition.



(a)



(b)

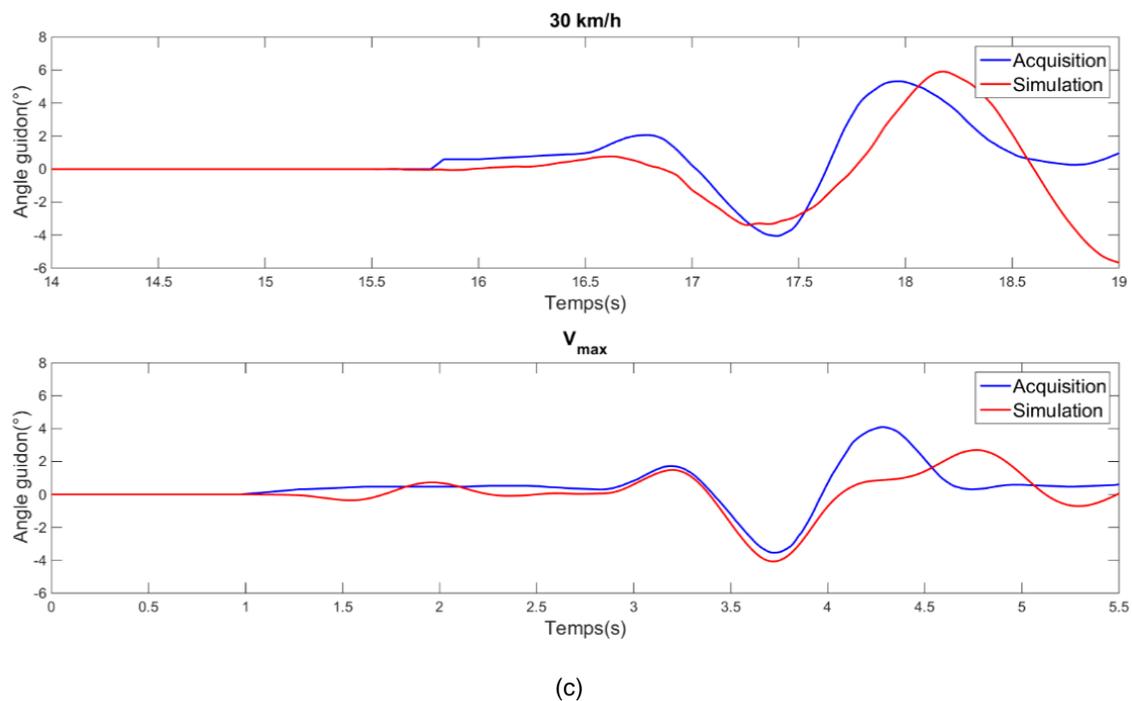


Figure 52 Comparaison des résultats issus de la simulation et de l'acquisition d'un évitement pour la trajectoire (a), l'angle de roulis (b) et l'angle guidon (c)

Les résultats présentés sur la Figure 52 (a) sont les trajectoires simulées à 30 km/h et V_{max} . Les trajectoires acquises ne sont pas représentées car le GPS centimétrique à 25 Hz n'a malheureusement pas fonctionné. L'utilisation du GPS classique à 1 Hz ne permet pas l'enregistrement suffisamment précis de la trajectoire. Il est donc impossible de comparer les trajectoires acquises et simulées. Lors des essais expérimentaux, il a été constaté qu'à V_{max} (environ 50 km/h) la trajectoire est plus directe qu'à 30 km/h où le conducteur peut prendre le temps de soigner sa trajectoire et est moins contraint par les cônes. Sur la Figure 52 (b) la comparaison des angles de roulis acquis et simulés à 30 km/h et V_{max} est présentée. On peut constater que le modèle a une meilleure réponse à haute vitesse qu'à une vitesse plus faible. A 30 et à 50 km/h, l'entrée dans l'évitement est le même que ce soit par simulation ou par acquisition mais dans la seconde partie, pour la sortie, une différence est à noter à 30 km/h mais pas à 50 km/h. Il y a cependant un léger décalage dans le temps (déphasage) entre la simulation et l'acquisition.

Sur la Figure 52 (c) la comparaison des angles guidon acquis et simulés à 30 km/h et V_{max} est présentée. Pour un évitement à 30 km/h, l'angle guidon maximum acquis est de 5° (6° pour le simulé). L'angle guidon maximal observé pendant la phase de contre-braquage est

de 2°. On peut noter que la sortie de l'évitement est plus sollicitante que l'entrée. En ce qui concerne l'angle de roulis, le maximum acquis est d'environ 20° (22° pour le simulé) et contrairement à l'angle guidon, il n'y a pas de différence entre les phases d'entrée et de sortie de l'évitement.

V. Détection d'un incident

Dans le cadre de cette thèse, une réflexion a été menée sur la possibilité de détecter des incidents. Les applications peuvent être de plusieurs types : déclenchement de gilet airbag, détection de zones à risque, ... Un projet similaire, S-VRAI² [48], a été mené pour les véhicules à quatre roues. La dynamique du véhicule a été étudiée afin de pouvoir identifier certains critères qui permettent de détecter un incident. Pour une voiture, la détection se base sur 3 combinaisons différentes :

- $\|AccX + AccY\| > 0.6 \text{ g}$ ET Vitesse $< 80 \text{ km/h}$ ET $\|JerkX + JerkY\| > 2 \text{ g/s}$

OU

- $\|AccX + AccY\| > 0.5 \text{ g}$ ET $80 \text{ km/h} < \text{Vitesse} < 0 \text{ km/h}$ ET $\|JerkX + JerkY\| > 2 \text{ g/s}$

OU

- $\|AccX + AccY\| > 0.4 \text{ g}$ ET Vitesse $> 100 \text{ km/h}$ ET $\|JerkX + JerkY\| > 2 \text{ g/s}$

Or, on sait que la dynamique du deux-roues motorisé est différente de celle des véhicules à quatre roues. Il est alors nécessaire de trouver de nouveaux critères valables pour la catégorie de véhicule qui nous intéresse.

Ces travaux ont été menés dans le cadre du projet DYMOA³. Ce projet a pour but de développer de nouvelles méthodes de diagnostic de la sécurité des infrastructures routières et de leurs usages par les deux-roues motorisé à l'aide d'enregistreur de données routières. Des enregistreurs de données routières de type smartphone ont été installés sur des motos de particuliers. Le but est de recueillir des informations sur la dynamique du véhicule lors d'incidents ou situations accidentogènes, c'est à dire lorsque le véhicule est fortement sollicité. Avant de pouvoir acquérir les données liées à cet incident, il faut d'abord le caractériser, d'un point de vue sollicitation dynamique, pour pouvoir le détecter. Les

² S-VRAI : Sauver des Vies par le Retour d'Analyse sur Incidents

³ DYMOA : diagnostic d'infrastructures et DYnamique du véhicule pour les MOtos et les Autos

campagnes d'essais réalisées et décrites précédemment ont donc été exploitées spécifiquement afin de pouvoir définir ces seuils. Le dépassement de ces seuils permettra de déclencher une acquisition spécifique. Une réflexion a donc été menée en fonction du type de manœuvre. En longitudinal, la solution est assez simple. En effet lors d'un freinage brutal ou d'un choc (par l'avant ou par l'arrière), l'accélération longitudinale varie fortement. En revanche, en transversal, il y a beaucoup plus de possibilité. Afin de détecter une perte de contrôle par exemple, il pourrait être intéressant de détecter un angle d'inclinaison important ou la brutalité avec laquelle l'angle d'inclinaison varie. Le choix a donc été d'observer la vitesse de roulis et l'accélération de roulis. Les valeurs maximales des critères citées ci-dessus ont été relevées et consignées dans le Tableau 13 .

Tableau 13 Valeurs maximales de l'accélération longitudinale, de la vitesse de roulis et de l'accélération

	Slalom			Evitement			Tours de circuit			Conduite sur route
	30 km/h	40 km/h	Vmax	30 km/h	40 km/h	Vmax	Vitesse constante 30 km/h	Sollicitations moyennes	Sollicitations fortes	Vitesse variable
Accélération longitudinale (g)	0,15	0,25	0,25	0,3	0,25	0,3	0,25	0,5	0,8	0,4
Vitesse de roulis (°/s)	75	100	120	80	100	110	70	60	85	40

de roulis pour des manœuvres de slalom, évitement et tour de circuit à différentes vitesses

Accélération de roulis ($^{\circ}/s^2$)	250	500	450	400	500	550	150	150	420	100
---	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Certains critères de détection utilisés dans le projet S-VRAI, comme le Jerk (la variation de l'accélération) par exemple, n'ont pas été retenus car ils ne sont pas adaptés à la moto. En effet, le Jerk permet de traduire la soudaineté, la brutalité d'une manœuvre notamment en sollicitation transversale (le Jerk est la dérivée de l'accélération transversale). Or, en moto, véhicule pendulaire, les accélérations transversales dans le repère embarqué sont "nulles" et celles dans le repère terrestre sont difficilement mesurables. A moto les manœuvres les plus pertinentes pour caractériser d'un point de vue dynamique un incident, un événement imprévu, sont en sollicitations transversales (variation de l'angle de roulis, variation de la vitesse de roulis...) et l'accélération longitudinale suffit pour caractériser le comportement longitudinal du véhicule.

Une réflexion a ensuite été menée avec le conducteur de la moto qui a réalisé les essais expérimentaux afin de définir quelles situations pouvaient être qualifiée comme manœuvre d'urgence. Lors des essais de slalom et d'évitement à 30 km/h, des tours de piste à 30km/h et des essais sur route, le pilote n'a pas eu la sensation de réaliser de manœuvre à la limite du contrôle. Lors de la définition des seuils, il faut donc les placer suffisamment haut pour qu'il n'y ait pas de déclenchement sur les manœuvres cités précédemment. Pour ce qui est des manœuvres réalisées à 40 km/h et les tours de circuit à sollicitation moyenne, le conducteur a jugé qu'elles pouvaient être considérées comme plutôt engageantes mais souvent "assimilables" à des sollicitations recherchées. En revanche à vitesse maximale, que ce soit les slaloms, évitements ou tours de circuit, le conducteur a jugé que les manœuvres étaient très sollicitantes et qu'on ne les rencontre que très rarement en conduite sur route en dehors de la réalisation d'une manœuvre imprévue et non souhaitée.

Après analyse des enregistrements réalisés, les seuils ont été définis comme suit :

- Accélération longitudinale : 6 m/s²
- Vitesse de roulis : 80°/s
- Accélération de roulis : 300°/s².

Les figures ci-dessous présentent les différents essais réalisés aux différentes vitesses ainsi que les seuils de détection d'un incident.

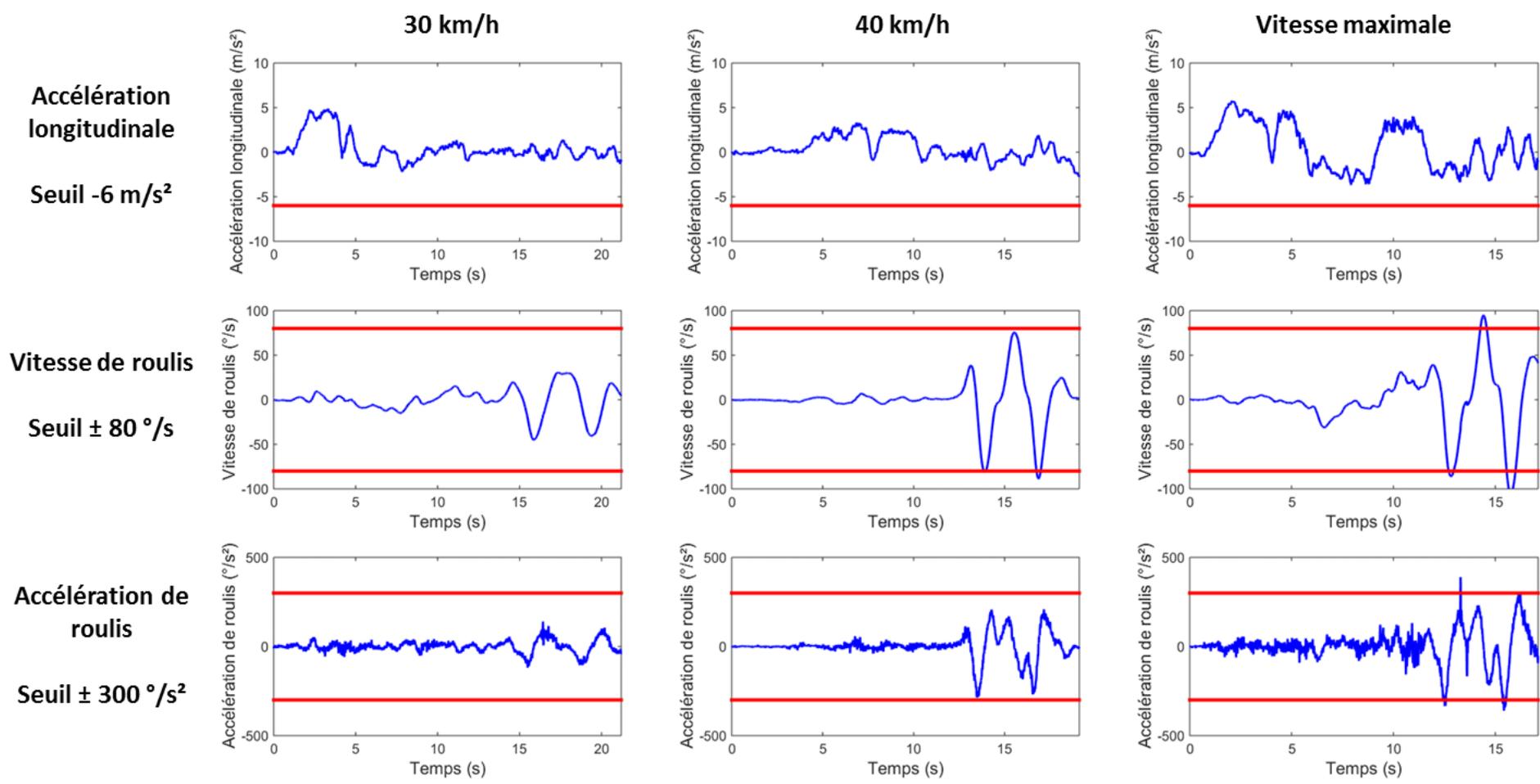


Figure 53 Seuils de détection d'un incident pour un slalom

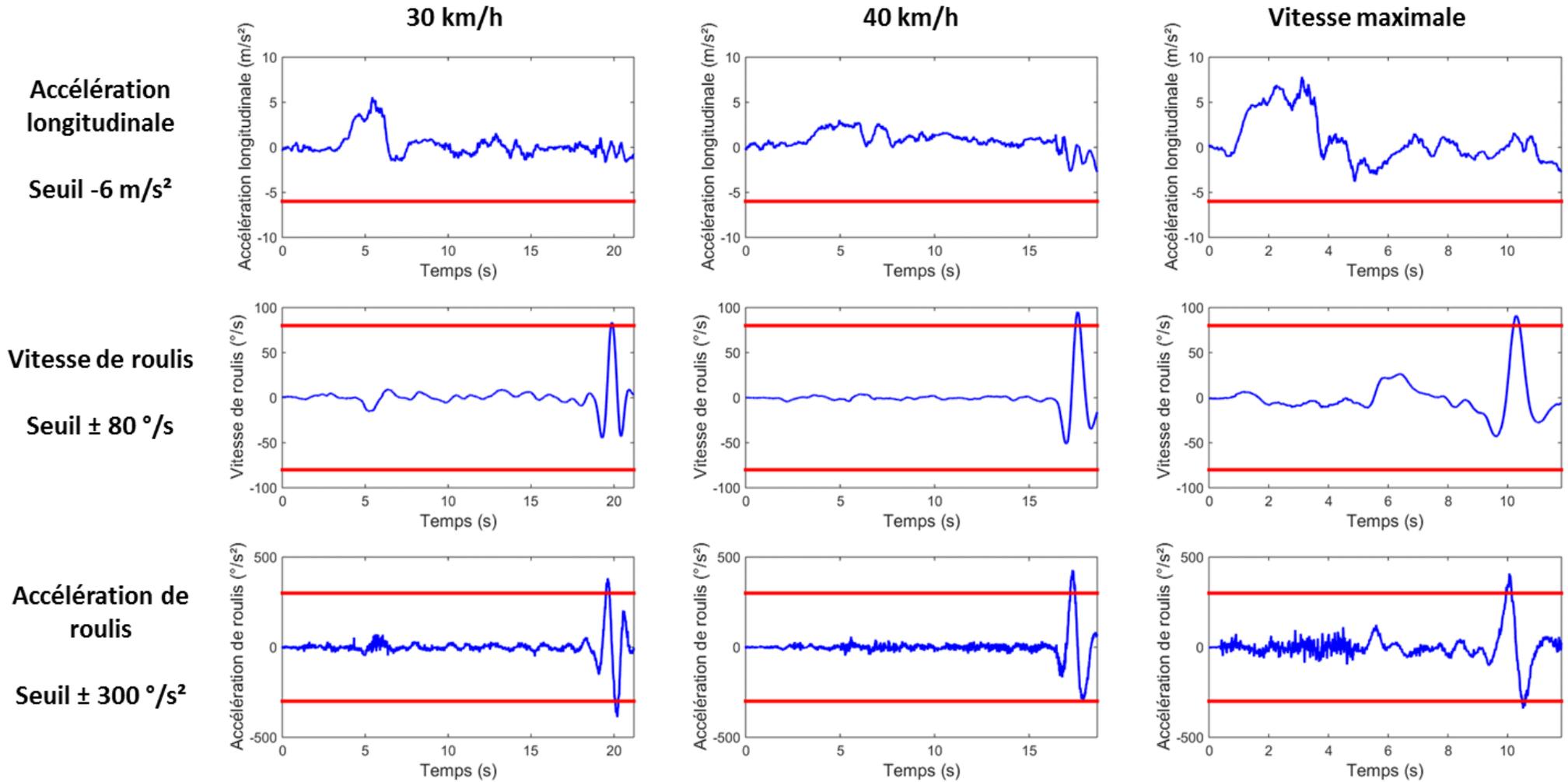


Figure 54 Seuils de détection d'un incident pour un évitement

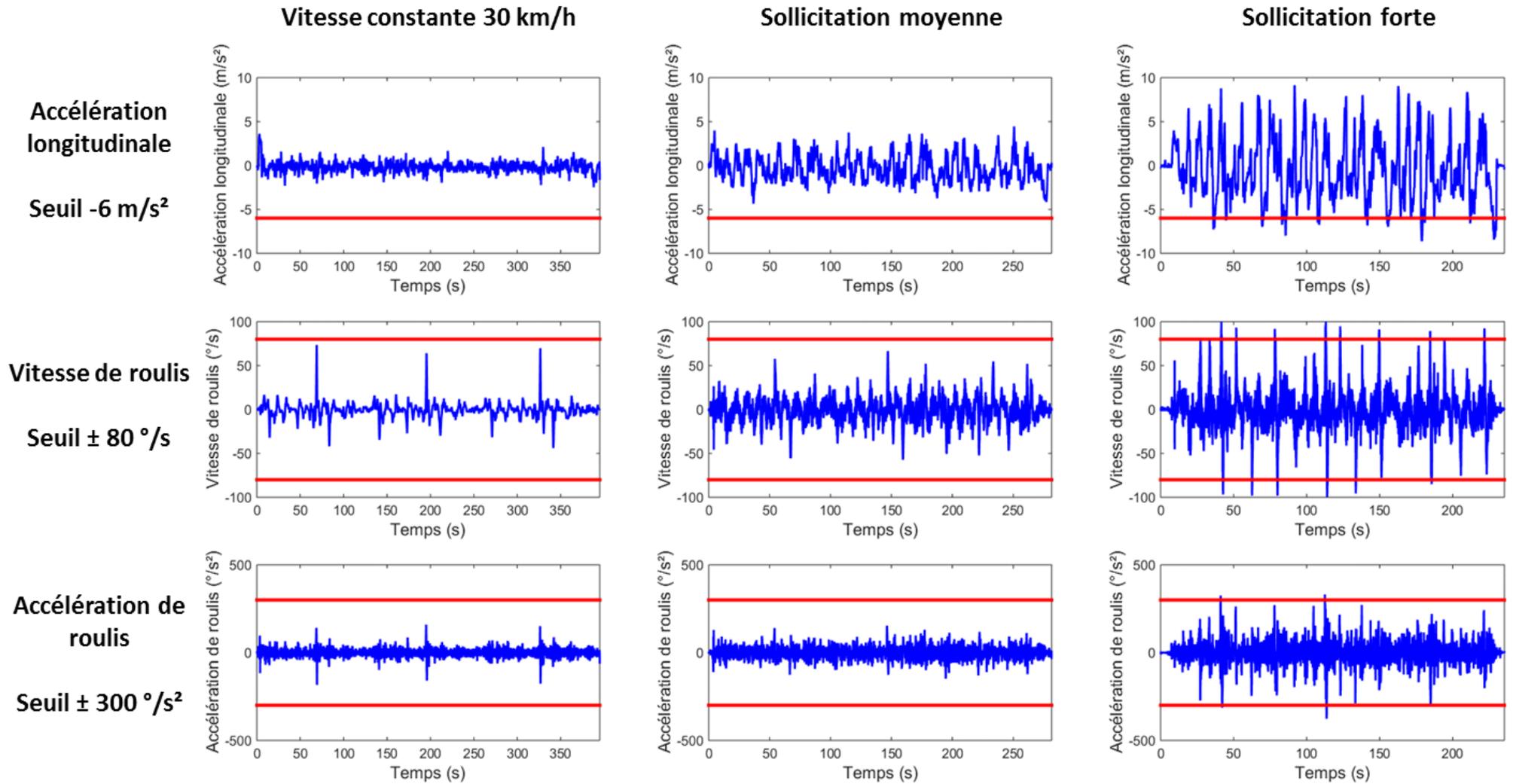


Figure 55 Seuils de détection d'un incident pour du roulage sur circuit

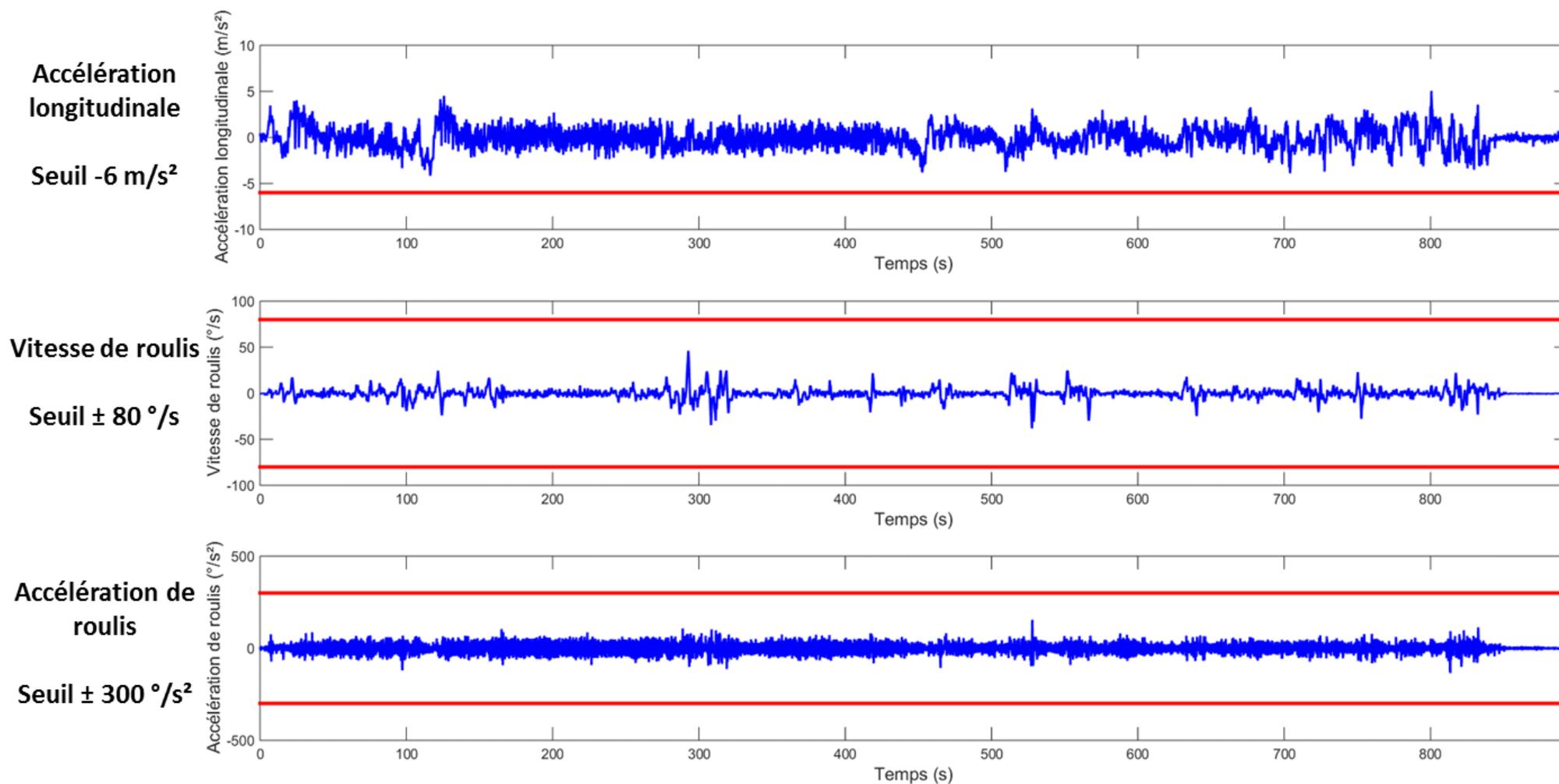


Figure 56 Seuils de détection d'un incident pour du roulage sur route

D'autres études ont été menées pour la détection d'incident, notamment par Ferhat Attal [49]. Ces travaux avaient pour objectif principal la mise au point d'outils d'analyse automatique de signaux acquis sur un 2RM, accélérations et vitesses de rotation dans les trois dimensions (X-Y-Z), en se basant sur l'apprentissage statistique. Le CEREMA a également réalisé des essais avec une moto instrumentée, la MACC (Moto d'Analyse du Comportement du Conducteur) sur des virages à faible et grand rayon ainsi que sur des giratoires [50]. Sur l'ensemble des essais aucune situation d'urgences n'est à signaler, lorsque les critères cités précédemment sont appliqués aux résultats d'essais, ils répondent à nos attentes et on ne détecte aucune situation d'incident.

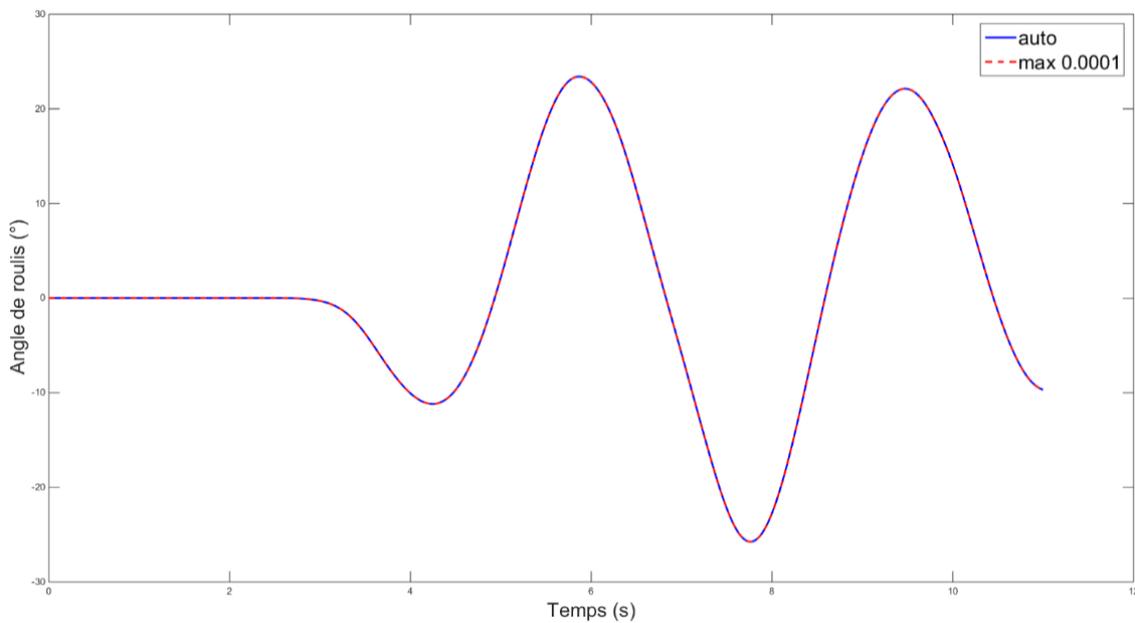
VI. Conclusion

Notre modèle multicorps de deux-roues motorisé a été construit afin qu'il soit capable de simuler des situations d'urgence mettant en jeu de fortes sollicitations dynamiques. Nous avons donc comparé les résultats des simulations à l'acquisition faite lors d'essais expérimentaux. Globalement le modèle multicorps a une bonne réponse dynamique en accord avec l'acquisition, aussi bien pour des sollicitations longitudinales que transversales. Pour des manœuvres de slalom et d'évitement le modèle est valide entre 30 et 50 km/h et pour des freinages entre 30 et 90 km/h. Ces gammes de vitesse couvrent une grande partie des situations qui peuvent être rencontrées en accidentologie routière.

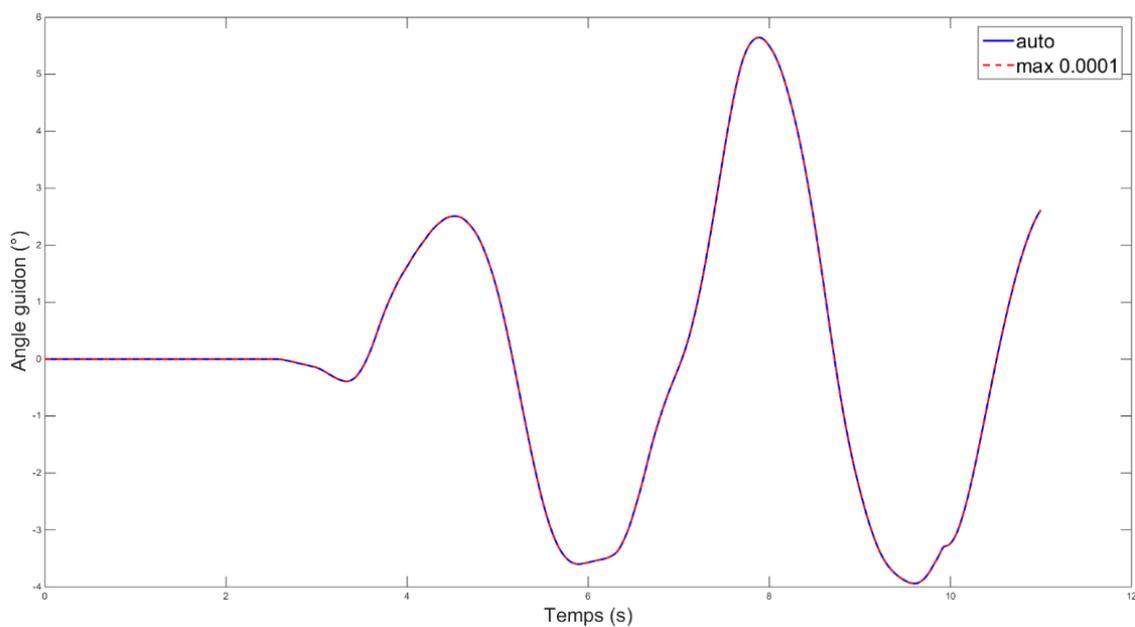
Le modèle a une meilleure réponse sur les hautes vitesses pour les slaloms et les évitements, cela est probablement dû aux entrées injectées dans le modèle. En effet, à haute vitesse, les actions du conducteur sont plus franches et les grandeurs physiques mises en jeu plus importantes, notamment sur le couple exercé sur le guidon. Ces dernières étant injectées dans le modèle, l'impact sur les résultats de la simulation est direct.

Nous aurions pu penser que cet écart est dû à la simulation et notamment au pas de simulation. En effet, nous utilisons avec le logiciel de simulation un pas variable automatique pour l'ensemble des simulations. On peut imaginer que pour un slalom à 30 km/h le modèle ne rencontre pas de problème majeur et ne diminue donc pas le pas de simulation contrairement à la même manœuvre à 90 km/h. Afin de vérifier cette hypothèse, nous avons réalisé une simulation avec un pas variable mais qui prend pour valeur maximale 0.0001s alors que précédemment la valeur maximale en automatique était de 0.001s. Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 57. Comme on peut le voir sur les Figure 57 (a) et Figure 57 (b), la variation du pas de temps n'a aucune influence sur les résultats de la

simulation, que ce soit sur l'angle de roulis ou l'angle guidon, les deux courbes se superposent parfaitement. Sur la Figure 57 (c), on peut observer qu'avec un pas de temps automatique 56397 points sont nécessaires à couvrir les 11 secondes de simulation alors qu'avec un pas de temps automatique maximum de 0.0001s, 110 729 points sont nécessaires. On peut toutefois noter que sur la courbe bleue Figure 57 (c), au moment d'entamer le slalom ($t=4s$), le solveur est obligé de changer le pas de simulation alors qu'aucune variation n'est observée sur la courbe rouge.



(a)



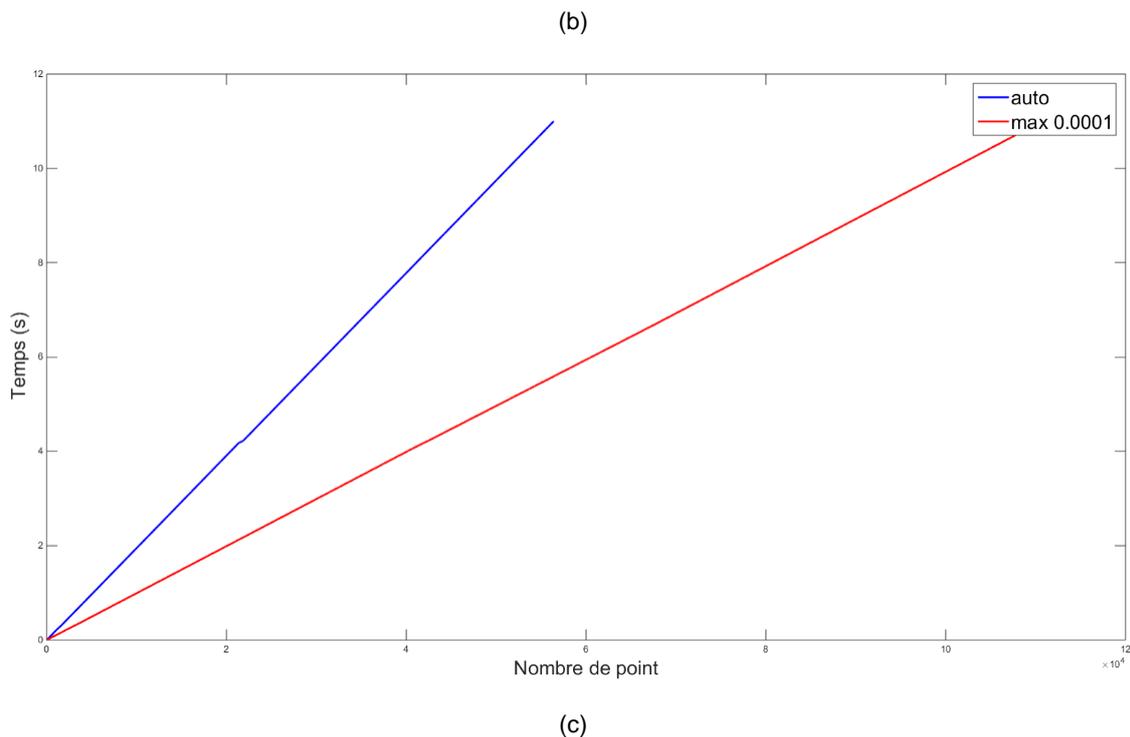


Figure 57 Angle de roulis (a), angle guidon (b) et variation du temps en fonction du nombre de point pour un slalom à 30 km/h simulé avec différents pas de temps.

L'hypothèse faite se justifie puisqu'aucune différence est à noter selon le pas de simulation utilisé.

Si le modèle réagit mieux à 90 km/h qu'à 30 km/h c'est donc probablement parce que les Inputs du modèle sont de grandeurs plus importantes, plus discriminantes et probablement moins sensible à l'imprécision de mesure.

Concernant le comportement dynamique d'un deux-roues motorisé en manœuvre d'urgence, ces travaux nous ont permis de dégager le niveau de sollicitation lors de telles manœuvres. Si l'on compare les slaloms et les évitements, à la vitesse de 30 km/h les angles de roulis et du guidon maximum sont semblables. En revanche à la vitesse de 50 km/h, les angles de roulis et du guidon sont plus importants pour le slalom que pour l'évitement.

En longitudinal, lors de freinage d'urgence, nous avons observé que plus la vitesse initiale est importante, plus la distance nécessaire à arrêter la moto augmente et la décélération moyenne diminue. Ces résultats concordent avec ceux d'une étude réalisée par le CEREMA qui s'est également intéressé à cette question et a réalisé une comparaison des capacités de freinage entre moto et voiture [51].

Cossalter et Lot [36] ont réalisé dans une étude des essais de slalom et de changement de file. Pour un slalom à 50 km/h, Cossalter et Lot ont observé un angle de roulis maximum de 28° et un angle guidon maximum de 5°. Comme cela a été présenté précédemment, dans cette étude un angle de roulis maximum de 30° et un angle guidon maximum de 6° ont été mesurés. Les résultats obtenus pour une manœuvre similaire, à la même vitesse mais avec une moto et un conducteur différents sont donc semblables.

Concernant la deuxième manœuvre, Cossalter et Lot ont réalisé des changements de file alors que dans cette étude ce sont des évitements qui ont été réalisés. Ces deux manœuvres ne sont pas totalement semblables car l'évitement est bien plus "serré" et "contraignant" que le changement de file. En effet, Cossalter et Lot ont réalisé des essais de changement de file à 90 km/h, en revanche, il est impossible de parcourir l'évitement à cette vitesse. Pour un changement de file à 90 km/h, ils ont mesuré un angle de roulis maximum de 40° et un angle guidon maximum de 4°. Pour un évitement à 50 km/h les valeurs maximales pour l'angle de roulis et l'angle guidon sont respectivement 35° et 4°. L'écart de vitesse est important entre les deux manœuvres cependant l'écart entre les valeurs acquises est faible, cela montre bien la brutalité de la manœuvre d'évitement, d'où la difficulté de définir des seuils d'incident en sollicitations transversales.

Maintenant que le modèle a été développé et validé pour des manœuvres extrêmes, il va pouvoir être testé et utilisé sur des cas réels d'accident impliquant des deux-roues motorisé.

Chapitre 4

Méthodologie de reconstruction d'accidents

“

Un accident est un évènement fortuit qui a des effets plus ou moins dommageables pour les personnes ou pour les choses.

”

Telle est la définition du dictionnaire or, d'un point de vue accidentologie,

"L'accident, un évènement qui survient toujours par surprise mais très rarement par hasard"

Comme nous l'avons présenté dans les chapitres précédents, un modèle multicorps de deux-roues motorisé prenant en compte les spécificités de la reconstruction d'accident a été développé. Il a été validé pour des manœuvres d'urgence tels que les freinages, les slaloms et les évitements à différentes vitesses. Dans ce chapitre, nous allons présenter la méthodologie utilisée ainsi que les résultats obtenus lors de l'utilisation du modèle sur des cas réels d'accident. Ces derniers proviennent de la base des Etudes Détaillées d'Accidents (EDA) du LMA de Salon de Provence. Nous présenterons dans un premier temps le système de recueil de données d'accidents puis dans un second temps, l'application de notre modèle à la reconstruction de deux cas : un cas en perte de contrôle en courbe et un cas de freinage d'urgence.

I. Présentation des EDA et méthodologie pour le recueil.

Afin de mener à bien une reconstruction d'accidents, il est nécessaire de pouvoir s'appuyer sur des données détaillées recueillies sur la scène même de l'accident. Plus la quantité et la précision des données recueillies sur les lieux de l'accident sont conséquentes, plus la reconstruction sera fiable et fidèle à la réalité. La méthodologie proposée par le LMA nécessite l'intervention de plusieurs personnes pour aller du recueil de données à la reconstruction d'accident à proprement parler. Lorsqu'un accident a lieu, une alerte

simultanée à celle des pompiers arrive directement au LMA ce qui permet aux deux enquêteurs, un(e) psychologue et un(e) technicien(ne) de se rendre rapidement sur les lieux pour y collecter un maximum d'informations « à chaud » et avant que les indices ne soient dégradés, que les véhicules ne soient déplacés.

➤ Le recueil par entretien auprès des impliqués.

Il s'agit de recueillir un récit de l'accident le plus précis et le plus détaillé possible, en vue de servir à la reconstruction. C'est le ou la psychologue qui s'occupe de cette tâche difficile dans le sens où il ne s'agit pas d'un questionnaire préétabli. La tâche de l'interviewer est de faire préciser par l'impliqué, situation par situation, ce qu'il voulait faire (intentions), ce qu'il a compris de ce qu'il a vu, ce à quoi il s'attendait (perceptions, interprétations, attentes), les écarts entre les événements et ses attentes, ce qu'il a essayé de faire (manœuvre), comment il s'y est pris (gestes). Ces données sont recueillies par l'enquêteur auprès des impliqués, directement sur les lieux de l'accident, si leur état physique le permet sinon à l'hôpital. Le but de cet entretien réalisé très rapidement après les faits est de ne pas laisser le temps à l'impliqué d'analyser et de reconstruire ce qu'il a vécu mais plutôt qu'il expose son ressenti. Un entretien complémentaire est réalisé idéalement dans les 48 heures qui suivent les faits. Il permet d'approfondir le récit de l'accident.

➤ Le recueil sur l'infrastructure et l'environnement

Il est principalement question ici de l'infrastructure et de son environnement, mais aussi de quelques données plus générales qui doivent être recueillies sur le site immédiatement après l'accident. Comme on l'a vu précédemment, pendant que le psychologue réalise l'entretien des impliqués, le deuxième enquêteur peut s'intéresser dans un premier temps à la position des véhicules impliqués, les traces laissées par ces derniers. Le technicien relève également l'heure, les conditions climatiques, la luminosité, l'état du trafic, l'état de la route, la position des véhicules aux abords de la chaussée (véhicules stationnés) Chaque trace, débris, obstacle ainsi que la position des véhicules impliqués sont marqués sur la chaussée puis photographiés afin de constituer le dossier. Dans les 48 heures qui suivent l'accident, l'enquêteur revient sur les lieux afin de procéder à des mesures dans le but de réaliser un plan. Il relève également la largeur de la chaussée, la position d'un feu ou cédez le passage, le rayon de courbure du virage éventuel mais aussi les abords (arbres, haies, panneaux publicitaires) qui pourraient constituer un masque à la visibilité. Une vidéo des véhicules en

approche de la zone de l'accident est également réalisée afin de bien comprendre comment le conducteur a pu percevoir l'infrastructure avant l'accident.

➤ Le recueil sur le véhicule

L'influence réelle des défauts sur le comportement du véhicule en situation d'accident est souvent difficile à déterminer car ils mettent en jeu les phénomènes complexes de la dynamique du véhicule. Le technicien qui s'est précédemment occupé du recueil sur l'infrastructure s'attelle également au(x) véhicule(s). Ces deux tâches peuvent avoir lieu en parallèle. Une partie des données peut donc être recueillie en temps réel. Il s'agit de données éphémères qui peuvent disparaître lors du déplacement du véhicule. Ces informations à récolter sur le terrain au moment de l'accident sont par exemple la charge du véhicule et la répartition du chargement, la position du levier de vitesse, la position des commodos (feux allumés, clignotants,), les gênes à la visibilité qui peuvent être présentes dans le véhicule, la pression des pneumatiques, ... Un contrôle visuel sans démontage est également réalisé pour témoigner de l'état général du véhicule. L'enquêteur va également relever toutes marques sur le véhicule lié au choc et leurs localisations. Dans les 48 heures qui suivent l'accident, le technicien va se déplacer au garage ou au domicile de la victime afin de procéder à une analyse plus complète et plus détaillée du véhicule. Il en profite également pour mesurer les déformations sur le véhicule.

➤ La reconstruction cinématique de l'accident

L'exploration des mécanismes, mis en jeu lors d'un dysfonctionnement du système conducteur/infrastructure/véhicule ayant conduit à un accident, nécessite de reconstituer le déroulement des faits avec le maximum de précision. Ainsi la reconstitution cinématique est un moyen d'enrichir le contenu d'un dossier détaillé d'accident, elle a pour objectif d'établir le scénario des événements successifs pour chacun des usagers impliqués dans l'accident, et de fournir le repositionnement réciproque le plus précis possible des différents véhicules en cause. Pour répondre de façon correcte à cet objectif de description spatio-temporelle de l'accident, l'interprétation et la confrontation de l'ensemble des données issues de la phase de recueil sont nécessaires. Il convient de tirer le meilleur parti, aussi bien des éléments matériels (traces présentes sur la chaussée, positions finales et déformations des véhicules, ...) que des informations contenues dans les témoignages des impliqués.

Afin de chiffrer l'évolution des paramètres cinématiques de chaque véhicule – position, vitesse, accélération- la méthode consiste à remonter dans le temps depuis les positions finales des véhicules jusqu'aux situations de conduite initiales en divisant l'accident en trois phases : la post-collision ou échappements, le choc proprement-dit et la pré-collision, dont la reconstitution est l'objectif principal dans une optique d'études orientées "sécurité primaire". Le principe de base est l'établissement d'une succession de séquences cinématiquement modélisables, décrivant le déroulement des faits vécus par chaque impliqué. L'obtention du scénario spatio-temporel global de l'accident, le plus précis possible, nécessite de veiller tout particulièrement à la cohérence des découpages des mouvements de chaque impliqué, considérés individuellement mais également l'un par rapport à l'autre. Pour cela, des modèles cinématiques très simples sont utilisés, cependant il est important de veiller aux bons choix de leurs paramètres.

Ainsi pour les phases de post et de pré-collision, le mouvement de chaque véhicule est modélisé à l'aide d'une succession de séquences cinématiques. Il s'agit essentiellement de mouvements à vitesse constante, ou de mouvement uniformément accélérés, dont les paramètres proviennent d'informations recueillis sur le terrain (distances), ou sont choisis par un expert en fonction des éléments dont il dispose (valeurs de décélérations selon la nature des traces sur la chaussée).

Le choc fait l'objet d'une analyse spécifique à partir d'un système d'équations de conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie. L'énergie dissipée dans les déformations d'un véhicule s'exprime sous la forme :

$$W_d = \frac{1}{2} m \times EES^2$$

où m est la masse du véhicule et EES est une vitesse équivalente (Energy Equivalent Speed). Les EES sont évalués par comparaison à des ETS (Equivalent Test Speed : vitesse de choc d'essais réalisés en situation contrôlée contre des obstacles fixes et indéformables). Dans la pratique, il faudrait comparer les déformations constatées sur les véhicules accidentés à celles obtenues dans les essais de référence et évaluer l'EES à partir des ETS disponibles pour le même véhicule dans une configuration de choc donnée [52].

Comme on a pu le voir au cours de ce paragraphe, la reconstruction d'accident est un processus complexe. La quantité de données, leurs pertinences et leurs détails sont les

garants d'une reconstruction d'accident fiable. C'est pour cela que le processus de recueil de ces données décrit précédemment est essentiel (voir Figure 58).

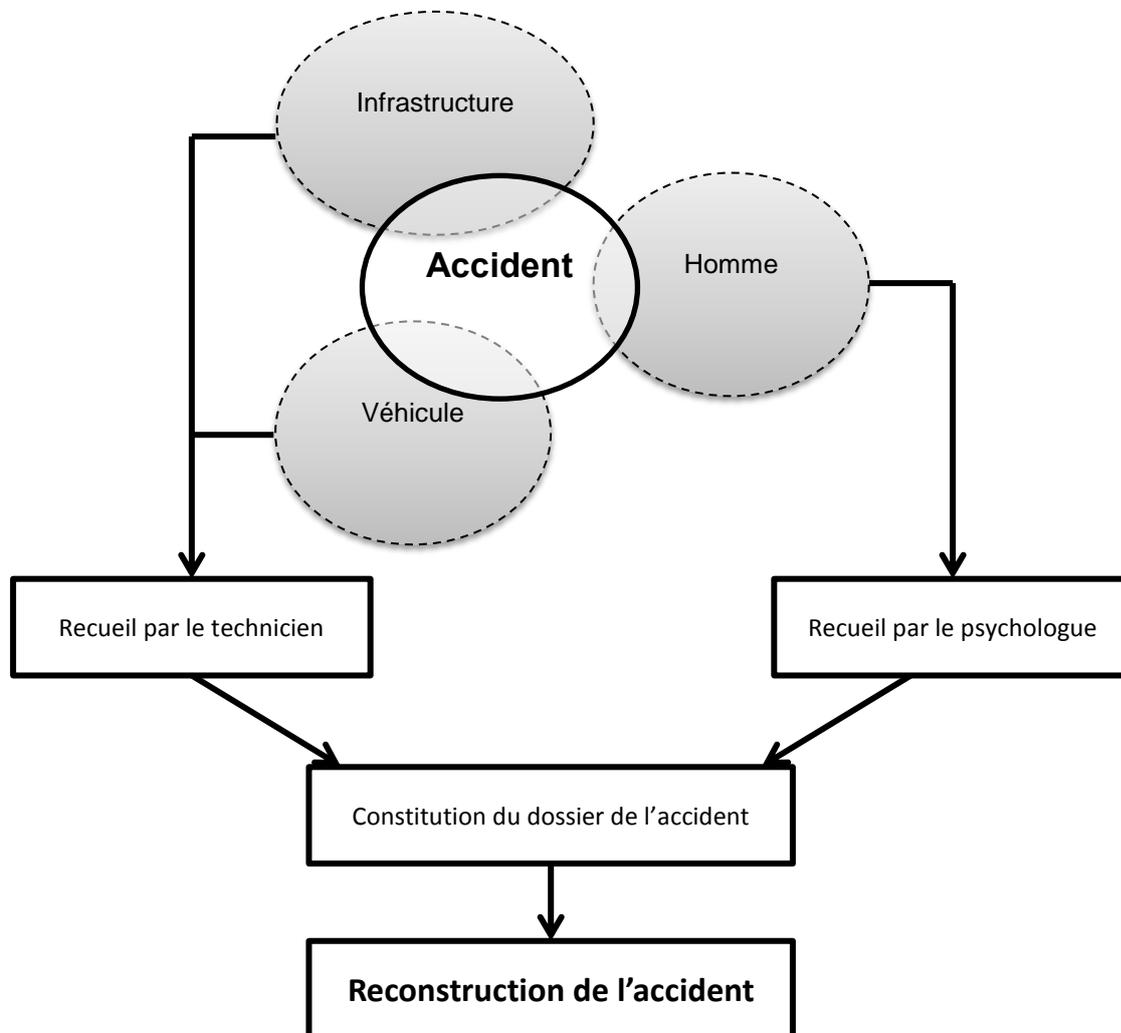


Figure 58 Méthodologie pour les EDA

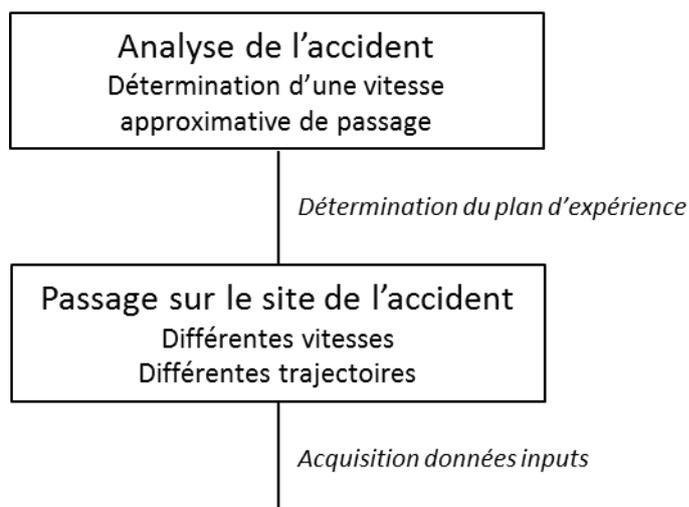
Comme nous l'avons évoqué précédemment, le modèle que nous avons développé permet de simuler et donc de mieux comprendre la phase de pré-collision. Cette phase reste la plus méconnue alors qu'une bonne connaissance des actions du conducteur et de leur répercussions sur la dynamique du véhicule au cours des quelques secondes avant l'impact permet d'optimiser la reconstruction de l'accident et ainsi mieux expliquer son déroulement. Afin de traiter la phase de pré-collision à l'aide du modèle multicorps que nous avons

développé, nous avons mis en place une méthodologie qui va être présentée dans le paragraphe suivant.

II. Méthodologie pour la reconstruction d'accident.

La méthodologie pour la reconstruction a pour objectif de déterminer la configuration la plus probable de l'accident. Le processus utilisé consiste à tenter de se rapprocher de la solution par étape successive en essayant de minimiser une fonction d'évaluation. Cette fonction peut être par exemple la distance entre le point de choc réel (respectivement point de chute) et le passage de la trajectoire simulée (respectivement la perte de contrôle). Pour ce faire, l'ensemble des éléments fournis par l'enquête d'accident, qu'ils soient qualitatifs ou quantitatifs sont utilisés. D'un point de vue qualitatif, il est important d'identifier par exemple la manœuvre d'urgence que le conducteur a tenté de réaliser pour pouvoir la reproduire. D'un point de vue quantitatif, les vitesses retrouvées par la reconstruction cinématique fournissent une valeur de référence qui va servir de condition initiale au processus itératif. La méthodologie se décompose en cinq grandes étapes (Figure 59) que nous allons détailler par la suite :

Figure 59 Méthodologie pour la reconstruction d'accidents



L'algorithme peut être associé à une recherche d'optimum. L'objectif est en effet de trouver la combinaison {Vitesse,Couple,Freinage} qui minimise un écart (distance entre le point de choc ou de chute et le passage de la moto ou la perte de contrôle).

1. Analyse de l'accident

Suite à la reconstruction cinématique de l'accident, un plan d'expérience est établi, il permet de définir les différents passages à réaliser. Il est important selon le type d'accident étudié de faire des passages en utilisant différentes trajectoires mais aussi différentes vitesses. Le but est d'avoir un maximum de données pour pouvoir les faire varier et les injecter. Il n'est en aucun cas nécessaire de prendre des risques puisque les données sont extrapolées pour atteindre la vitesse souhaitée.

2. Passage sur les lieux de l'accident

Cette deuxième étape est très importante car elle permet de recueillir les données qui serviront d'entrée au modèle. Comme nous l'avons évoqué précédemment la vitesse et le couple appliqué par le conducteur sur le guidon sont les deux paramètres qui sont injectés comme entrées dans le modèle pour le faire fonctionner. Ces deux entrées sont acquises, en même temps que beaucoup d'autres, lors de passages sur les lieux de l'accident réalisé avec la moto instrumentée.

3. Validation des signaux acquis

Les données de couple et de vitesse acquises précédemment sont traitées : une moyenne mobile sur 30 points, une correction des offsets et de la dérive sont réalisées. Les signaux sont également adaptés pour être utilisables par le modèle, ils sont coupés pour ne garder que la séquence qui nous intéresse et des phases de stabilisation de la vitesse sont ajoutées en amont. Une première simulation est alors lancée pour vérifier que le modèle reproduit fidèlement le passage réalisé sur le site de l'accident. À partir de l'étape suivante, nous sommes dans l'obligation de faire une distinction selon le type d'accident. En effet, pour une perte de contrôle en courbe a priori sans manœuvre de freinage d'urgence, la variation du freinage ne rentre pas en compte, les seules données à moduler sont le couple et la vitesse.

Pour un accident avec freinage d'urgence, en plus de ces dernières, il faut ajouter le moment où débute le freinage, sa durée et son intensité.

4. Modulation des paramètres d'entrée du modèle

a. Méthode pour la perte de contrôle.

Une fois l'étape précédente validée, les entrées sont modulées. Une matrice est alors créée pour définir l'ensemble des combinaisons possibles avec les variations de couple et de vitesse définies par l'utilisateur. Pour commencer, il est préférable de balayer un large champ des possibilités en faisant varier la vitesse et le couple de référence (mesurés au cours d'un passage retenu comme optimal et mis en forme comme décrit précédemment) entre -80% et +80% avec un pas de 20%.

b. Méthode pour le freinage d'urgence

La méthode pour le freinage d'urgence est la même que celle pour la perte de contrôle à l'exception qu'il faut ajouter les modulations concernant le freinage. Pour cela, nous repérons approximativement, mais en tenant compte des traces de freinage relevées sur la scène de l'accident, l'endroit où le freinage a pu débiter et nous faisons varier cet instant de plus ou moins 3 secondes avec un pas de 1s. Pour n'exclure aucune possibilité, la durée de freinage peut aller jusqu'à 3 secondes avec un pas de 0.5 secondes et son intensité est modulée entre -5 m/s^2 et -9 m/s^2 .

5. Analyse des résultats de simulation

a. Méthode pour la perte de contrôle.

Une fois l'ensemble des simulations terminé, les résultats peuvent être analysés. Pour cela nous relevons l'angle guidon, l'angle de roulis et la vitesse de la roue avant au moment où la trajectoire passe au plus près du point de choc afin de déterminer si la moto a chuté au moment de passer ce point. Nous calculons également l'écart entre la trajectoire simulée et le point de choc pour chacune des combinaisons possibles. Un calcul est réalisé afin de déterminer si lors de la simulation le véhicule passe à droite ou à gauche du point de choc. Tous ces résultats sont consignés dans un tableau que nous appellerons la matrice des résultats. De plus, un histogramme qui a pour abscisse et ordonnée le couple et la vitesse trace les écarts entre le point de choc et la trajectoire. On appellera ce diagramme minimisation de la fonction d'évaluation. Cela permet de faire apparaître les zones où la

combinaison couple/vitesse semble être optimale pour que l'écart de trajectoire (trajectoire simulée / point de choc ou chute) soit minimal. De plus, pour chaque simulation nous traçons la trajectoire acquise, simulée et le point de choc sur un fond Google Maps afin d'avoir un visuel sur la simulation.

Pour ce qui est de l'analyse des résultats, nous nous basons sur la matrice des résultats. Des détails seront donnés sur cette étape lors de l'application au cas d'accident.

b. Méthode pour le freinage d'urgence

Comme pour la perte de contrôle, une fois les simulations terminées nous pouvons passer à l'exploitation des résultats. Ces derniers sont consignés dans un tableau et non plus dans une matrice. Dans ce tableau nous faisons apparaître pour chaque simulation, l'écart entre la trajectoire et le point de choc ou de chute, la vitesse au passage de ce point, l'écart entre le moment où le modèle chute et le point de choc, l'endroit de passage de la simulation par rapport au point de choc (gauche, droite ou chute), la modulation du couple, de la vitesse, du moment où débute le freinage, de la durée et de l'intensité. Comme pour la perte de contrôle, pour chaque simulation nous traçons la trajectoire acquise, simulée, le point où le modèle chute (s'il chute) et le point de choc sur un fond de carte Google Maps afin d'avoir un visuel sur la simulation.

Concernant l'analyse des résultats, nous faisons ressortir dans le tableau toutes les combinaisons où l'écart entre la trajectoire et le point de chute/choc est supérieur à 3 mètres ainsi que celles où le modèle chute largement avant le point de chute de l'accident.

De manière générale, le processus de détermination de la configuration la plus probable de l'accident s'apparente à un processus itératif. Un premier tri permet de restreindre le champ des possibilités, une nouvelle simulation plus ciblée peut-être lancée. Il faut alors reprendre l'étape n°3 (Extrapolation des Inputs) de la méthodologie jusqu'à ce que les résultats soient suffisamment précis. En général trois à quatre vagues de simulations sont nécessaires pour identifier une plage de vitesse en entrée de choc suffisamment précise et satisfaisante pour la compréhension de l'accident.

Une fois la méthodologie bien définie, nous pouvons appliquer celle-ci à des cas réels. Les accidents qui sont traités par la suite sont issus des EDA et nous avons décidé d'en traiter deux survenus dans des configurations différentes. Le premier est une perte de contrôle en courbe. Le second est également une perte de contrôle en courbe mais celle-ci est la conséquence d'une manœuvre de freinage d'urgence.

III. Cas n°1 : perte de contrôle en courbe

1. Présentation du cas

Ce cas implique une moto seule en perte de contrôle en courbe. La moto est une Yamaha 600XJ conduite par un homme de 25 ans accompagné d'un passager. Le conducteur possédait le permis moto depuis 1 an et demi et utilisait la moto uniquement pour les loisirs. L'entretien avec l'impliqué n'a pas eu lieu puisque ce dernier est décédé sur le coup, une prise de sang post-mortem indique un taux d'alcoolémie important. Le plan de l'accident réalisé par l'équipe EDA est présenté Figure 60.



Figure 60 Plan du cas d'accident n°1

Comme on le voit sur la Figure 60, la moto arrive de la gauche, portion limitée à 50 km/h, et vient taper l'îlot central qui délimite l'intersection avec la route qui vient de sa droite. On peut observer un second choc avec le trottoir. Le corps du conducteur décédé est retrouvé 32 mètres après le point de choc près du muret en béton, le passager a été projeté à 56 mètres et la moto termine sur la chaussée du pont 48 mètres plus loin que le point de choc.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 61 Photos du cas d'accident n°1

La question que l'on se pose maintenant est la suivante : pourquoi le conducteur n'a pas réussi à suivre la courbe ? Cela est-il dû à une erreur de sa part dans l'appréciation du rayon

de courbure, n'a-t-il pas suffisamment rapidement pu tourner, la vitesse était-elle excessive ? A l'aide de simulations réalisé avec le modèle nous allons pouvoir nous intéresser à la phase de pré-choc et tenter de répondre à ces questions.

2. Analyse de l'accident

Au vu des traces sur la chaussée, des déformations de la moto et de la position des débris (Figure 61 (b)) sur les lieux de l'accident nous pouvons envisager un premier scénario. La moto arrive de la gauche, le virage se resserre mais le conducteur ne parvient pas à suivre la courbe, il vient taper la bordure de l'îlot (Figure 61(c)) alors que sa moto est inclinée sur la gauche. Au vu des déformations sur la moto, elle vient impacter le trottoir (Figure 61(d)) avec un angle déjà important puisque au moment du choc le carter gauche du moteur est arraché mais le dessous de la moto est intact (Figure 61(a)). Conducteur et passager sont éjectés du véhicule au moment du choc.

La reconstruction cinématique réalisée par les EDA propose le scénario suivant :

- 2.48 secondes avant impact, premier ralentissement, vitesse de 121 km/h
- 1.72 seconde avant impact, rupture, le virage se resserre mais le conducteur ne réduit pas suffisamment sa vitesse, vitesse de 117 km/h
- Au moment de l'impact avec l'îlot la vitesse estimée est de 92 km/h

3. Passage sur les lieux de l'accident

À l'aide de la moto instrumentée, nous sommes passés sur les lieux de l'accident. Afin de disposer d'un panel de données suffisamment complet, nous avons établi un plan d'expérience. Nous avons choisi de réaliser les passages avec deux trajectoires différentes, une trajectoire normale que n'importe quel conducteur emprunterait et une trajectoire plus proche de l'îlot (Figure 62). Pour chacune de ces deux séries, les vitesses relevées au point de choc sont environ 50, 60, 70, 80, 90, 95 km/h. Chaque essai est répété 3 fois, ce qui fait au total 36 passages.

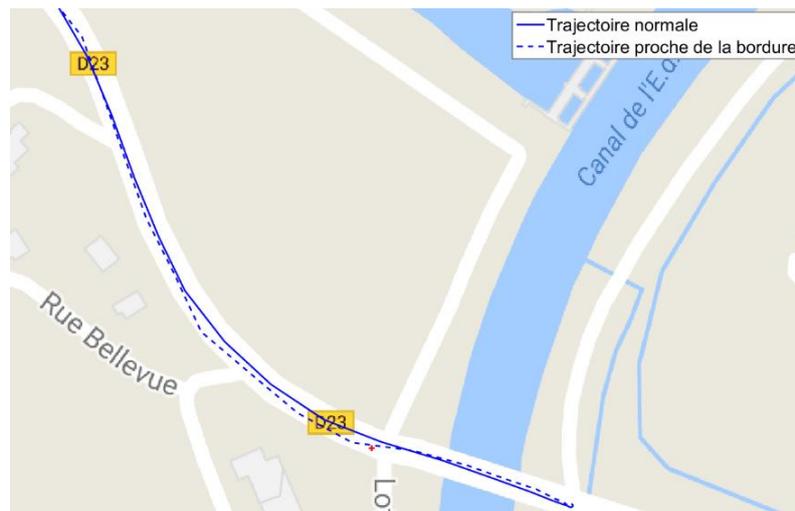
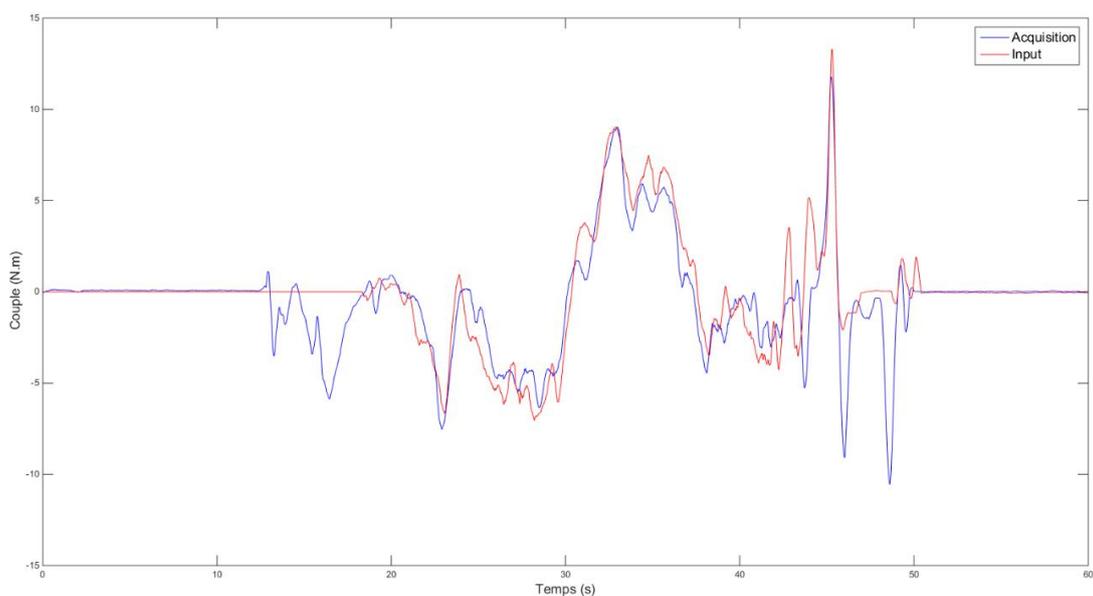


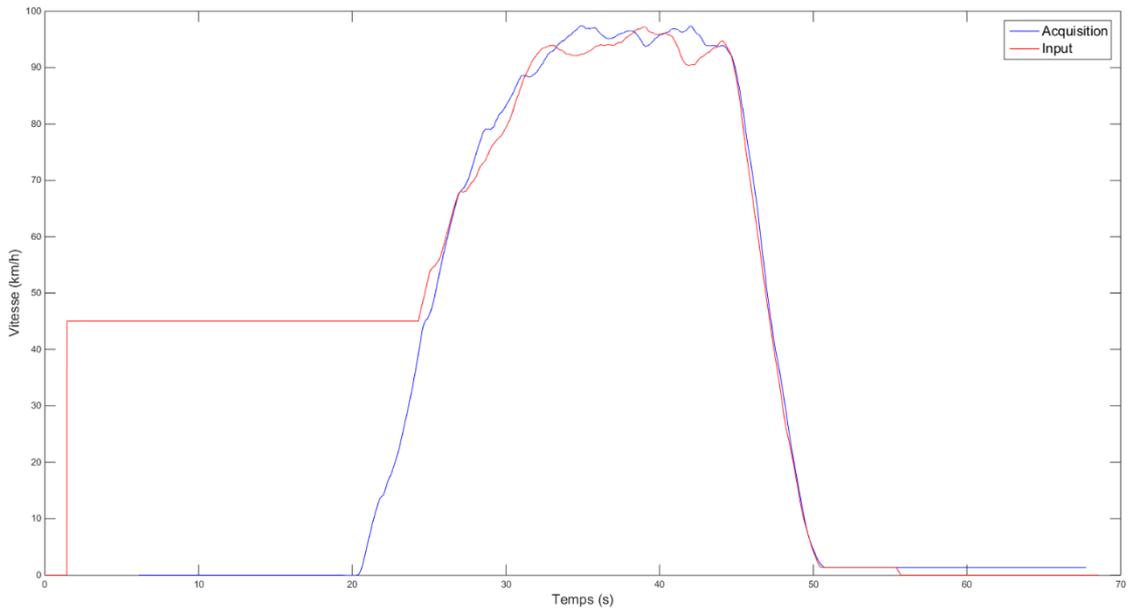
Figure 62 Différentes trajectoire acquises pour l'accident n°1

4. Validation des signaux acquis

Au vu des déformations, la vitesse au moment du choc est importante. Nous avons donc choisi un passage à 95 km/h avec une trajectoire proche de la bordure comme base de travail. Nous avons traité les données acquises afin de pouvoir les injecter dans le modèle. Sur la Figure 63, sont tracés les données acquises et les inputs de couple (a) et de vitesse (b). Les inputs correspondent aux données brutes traitées et recalées. De plus, nous avons modifié le poids du corps du châssis afin de prendre en compte au mieux le passager présent sur le véhicule au moment de l'accident.



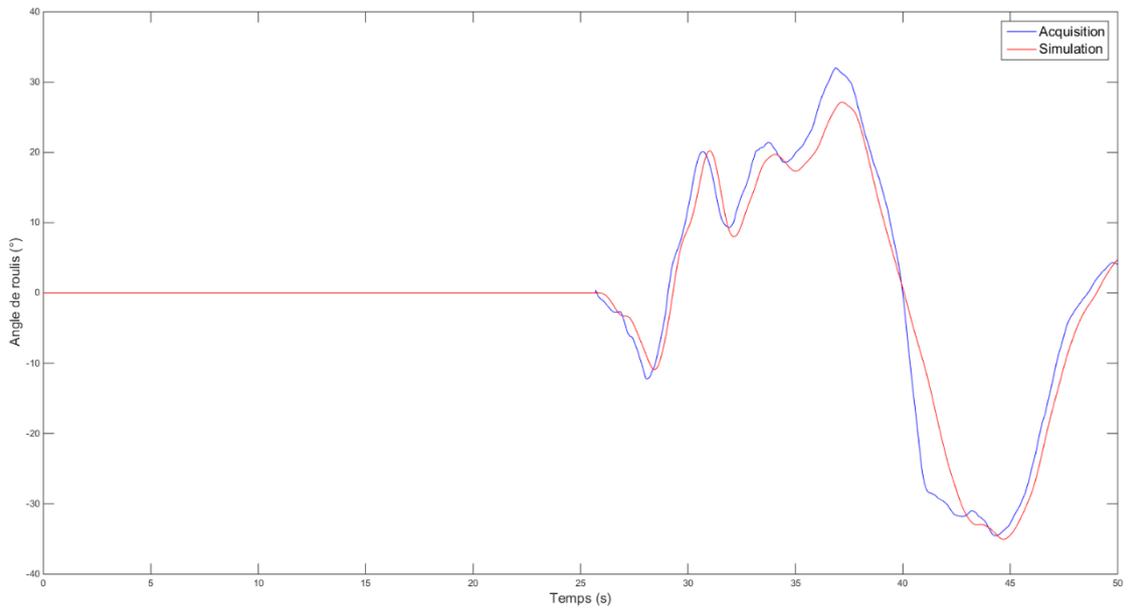
(a)



(b)

Figure 63 Input de couple (a) et de vitesse (b)

Ces données sont injectées dans le modèle sans aucune modification afin de vérifier que la base de travail est bonne et que par conséquent le modèle simule correctement le passage réalisé.



(a)



(b)

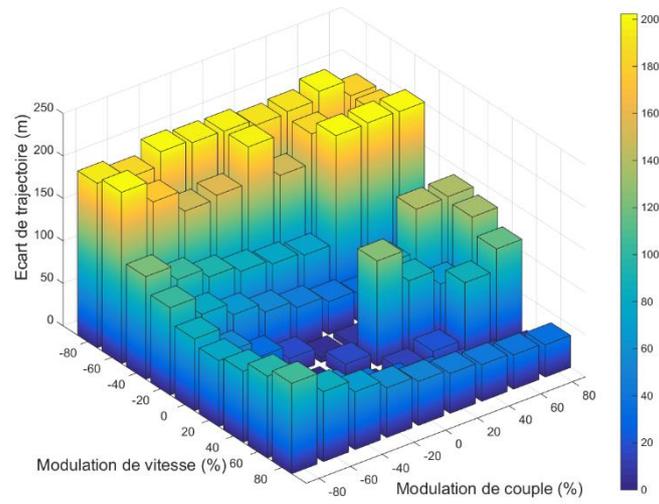
Figure 64 Angle de roulis et trajectoire simulés sans modifications des inputs

Les résultats de la simulation sont présentés dans la Figure 64. Comme nous pouvons l'observer, la trajectoire ainsi que l'angle de roulis acquis et simulés se superposent bien. Nous pouvons donc considérer que la base de travail est bonne et que par conséquent ces inputs peuvent être modulés afin de procéder au reste du travail.

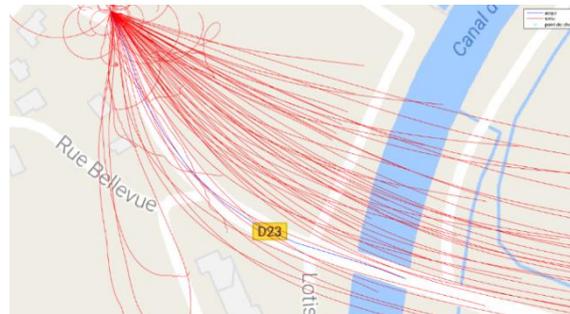
5. Modulation des paramètres d'entrée du modèle

a. Configuration n°1

Comme nous l'avons évoqué précédemment, il est important pour la première vague de simulation de balayer un champ assez large. Pour la première configuration nous avons choisi de faire varier, par rapport au passage retenu comme référence, le couple et la vitesse de -80% à +80% avec un pas de 20%. Au total, 81 simulations ont été lancées.



(a)



(b)

Figure 65 Minimisation de la fonction d'évaluation (a) et trajectoires simulées(b) pour la Configuration n°1 du cas d'accident n°1

Chapitre 4
Méthodologie de reconstruction d'accidents

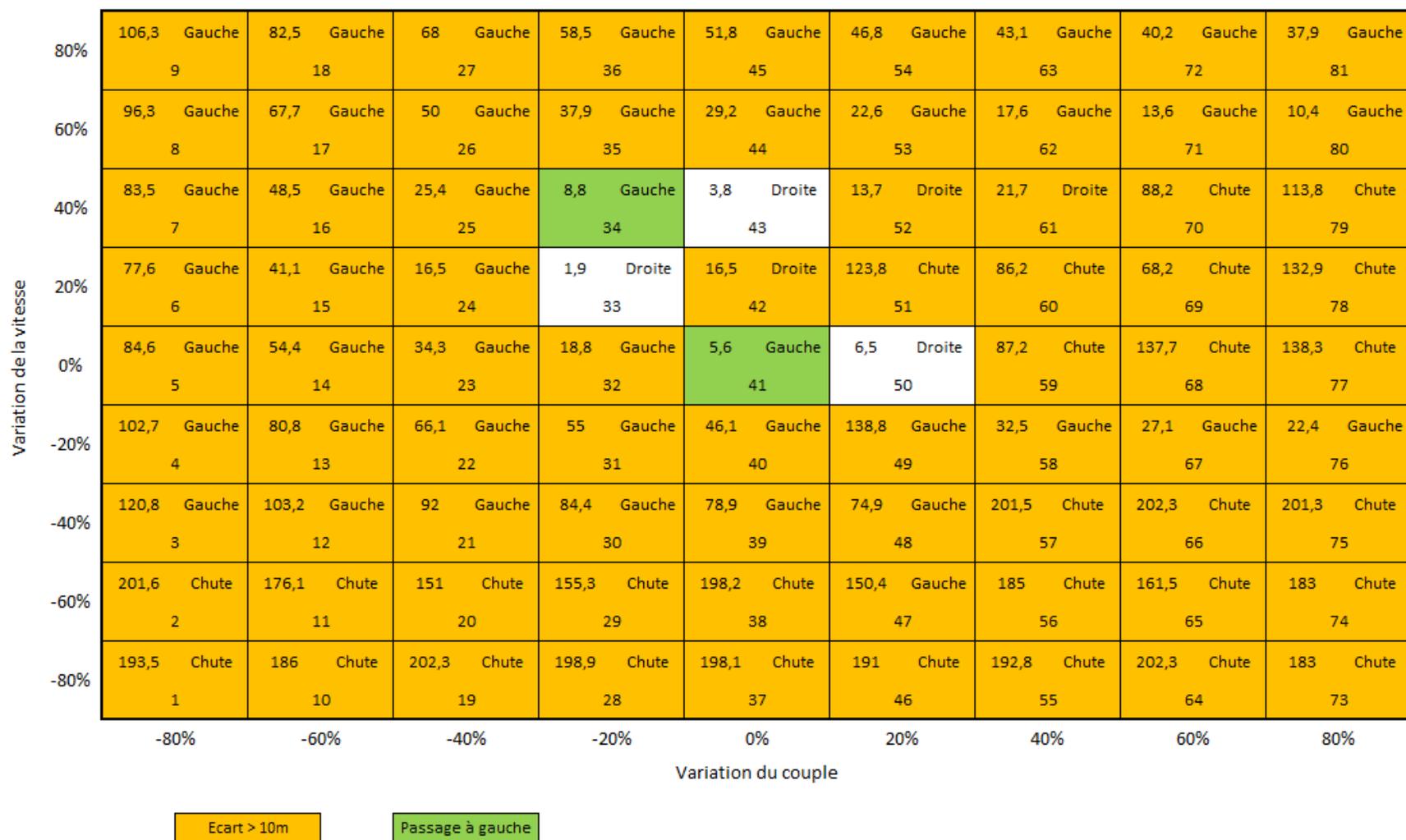


Figure 66 Matrice des résultats de la Configuration n°1 pour le cas d'accident n°1

Sur la Figure 65(a) et (b) sont représentés respectivement sous forme de minimisation de la fonction d'évaluation, les écarts entre la trajectoire et le premier point de choc et l'ensemble des trajectoires simulées selon les variations des inputs. Sur la Figure 66 est présentée la matrice des résultats, on y voit apparaître pour chaque simulation le numéro de la simulation, l'écart entre le point de choc et la trajectoire ainsi que la position de la trajectoire simulée par rapport au point de choc. Pour chaque combinaison vitesse/couple les résultats sont présentés comme suit :

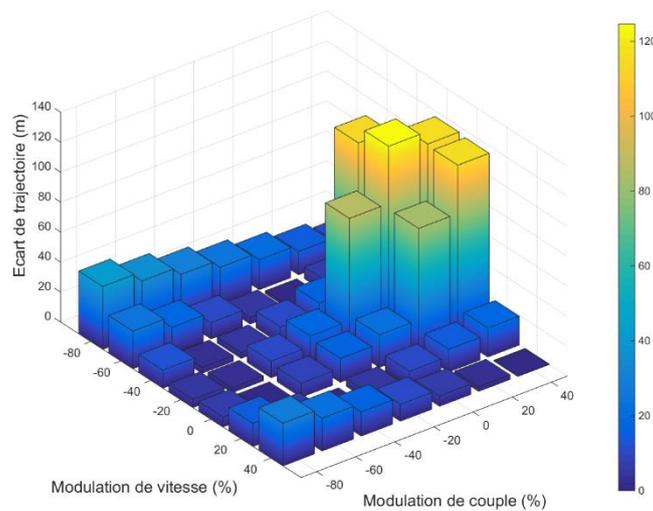
Ecart point de choc	Position trajectoire par rapport au point de choc
Numéro de simulation	

La Figure 65 (b) présente l'ensemble des trajectoires simulées. En plus, pour chaque combinaison, les trajectoires acquises et simulées sont tracées ce qui permet d'avoir un meilleur visuel sur les résultats de la simulation.

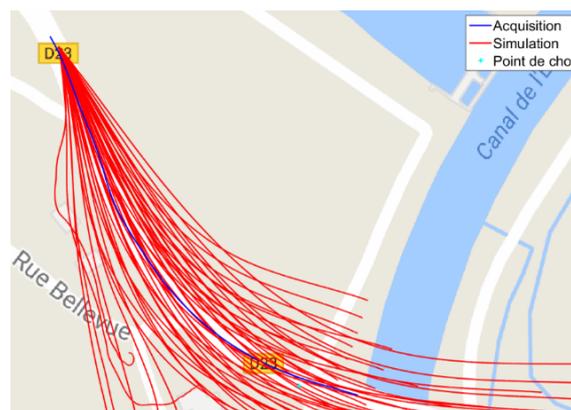
Comme on le voit sur la Figure 65 (a) il y a un ensemble de combinaison qui minimise l'écart entre le point de choc et la trajectoire simulée. L'ensemble des solutions, où la hauteur des barres est la plus faible, forme un U. Cela signifie que pour un même couple il y a deux vitesses de passages envisageables pour un écart relativement faible. Il faudra alors se servir des autres résultats pour éliminer si possible une « branche » du U. Nous nous intéressons alors à la matrice des résultats. Pour cette première vague de simulation, nous nous intéressons tout d'abord à l'écart entre le point de choc et la trajectoire simulée et nous écartons toutes les combinaisons où l'écart est supérieur à 10 mètres (combinaisons surlignées en jaune sur la Figure 66). Dans un second temps nous écartons les combinaisons où la trajectoire simulée passe à gauche du point de choc (combinaisons surlignées en vert dur la Figure 66). Ensuite, un contrôle visuel est fait sur les figures où les trajectoires sont générées individuellement afin de vérifier qu'aucune combinaison n'est écartée par erreur. Une fois ce travail de sélection terminé, nous pouvons restreindre le champ des solutions et procéder au lancement d'une seconde vague de simulations avec des plages de variations des entrées plus réduites

b. Configuration n°2

Une fois l'étude des résultats de la Configuration n°1, nous pouvons procéder à de nouvelles simulations. Nous avons donc choisi de faire varier cette fois le couple sur l'intervalle -30% +30% avec un pas de 10% et la vitesse sur une plage de -10% +50% avec un pas de 10%. Cela représente 49 combinaisons possibles. Comme précédemment, nous obtenons la figure qui représente la minimisation de la fonction d'évaluation (Figure 67 (a)) et l'ensemble des trajectoires simulées sur une même figure (Figure 67 (b)) ainsi que la matrice des résultats (Annexe 3 Figure 93).



(a)



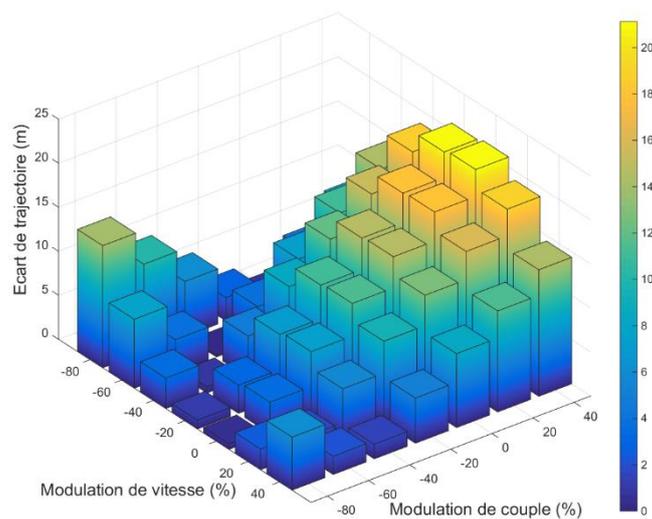
(b)

Figure 67 Minimisation de la fonction d'évaluation (a) et trajectoires simulées (b) pour la Configuration n°2 du cas d'accident n°1

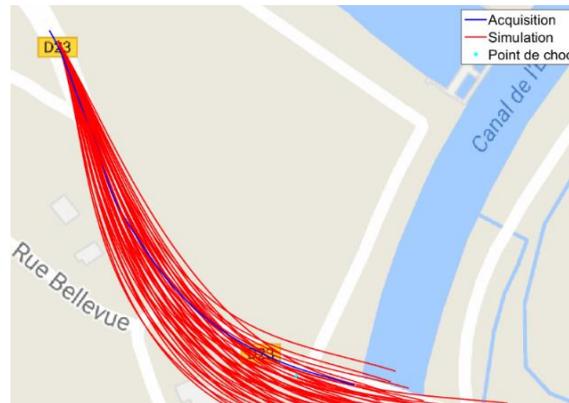
La Figure 67 présente la fonction d'évaluation qui minimise l'écart, et comme précédemment, nous retrouvons ce U dans les solutions envisageables. Concernant la matrice des résultats, un premier tri est effectué afin de supprimer les combinaisons où l'écart entre le point de choc et la trajectoire simulée est supérieur à 10 mètres. Les combinaisons où la trajectoire simulée passe à gauche du point de choc sont également écartées. Une fois ce premier tri effectué, sur les 49 combinaisons il en reste 9. Un tri visuel permet de distinguer les trajectoires aberrantes et réduire à 3 le nombre de combinaisons possibles pour des modulations de vitesse allant de +10% à +30% et de couple allant de -20% à -10%. Afin de préciser les résultats nous allons procéder au lancement d'une troisième vague de simulation.

c. Configuration n°3

Une nouvelle série de simulation a donc été relancée avec des intervalles pour des modulations de couple et de vitesse à nouveau resserrées. Suite aux résultats des simulations avec la Configuration n°2, nous faisons le choix pour la 3^{ème} de restreindre le couple entre -25% et +5% avec un pas de 5% et la vitesse entre +5% et +35% avec un pas de 5%. Cela représente 49 combinaisons possibles.



(a)



(b)

Figure 68 Minimisation de la fonction d'évaluation (a) et trajectoires simulées (b) pour la Configuration n°3 du cas d'accident n°1

La matrice des résultats (Annexe 3 Figure 94) permet de supprimer les combinaisons où l'écart entre le point de choc et la trajectoire simulée est supérieur à 5 mètres. Cela correspond aux valeurs représentées dans les tons bleu clair, vert et jaune sur la Figure 68 (a). Les combinaisons où les trajectoires simulées passent à gauche du point de choc sont également écartées. Il reste alors 14 combinaisons possibles. Un premier tri visuel est fait afin de restreindre le champ des possibilités.

Pour une même variation de couple, il y a deux vitesses de passage qui proposent des écarts entre la trajectoire et le point de choc relativement faible. Si l'on prend pour exemple les simulations n° 16 et 21 la modulation du couple est de -15%, celle de vitesse est de +10% pour la simulation n°16 et +35% pour la n°21. Pour ces deux simulations, les écarts entre le point de choc et la trajectoire sont respectivement 0.2 mètres et 1.7 mètres. Il faut alors procéder à un contrôle visuel des trajectoires pour pouvoir en éliminer une. En effet, il n'est pas possible que pour le même couple il y ait deux trajectoires correctes avec deux vitesses différentes.

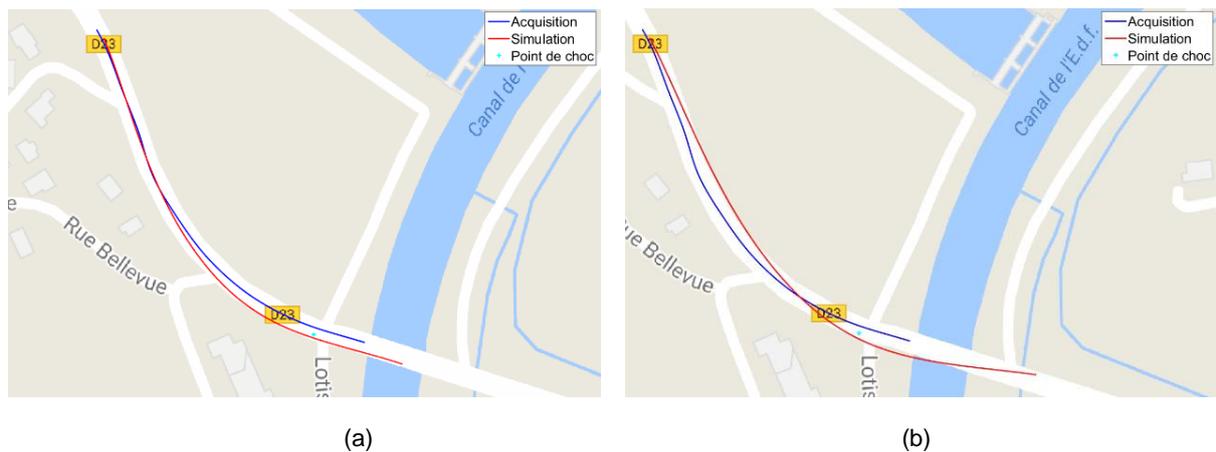


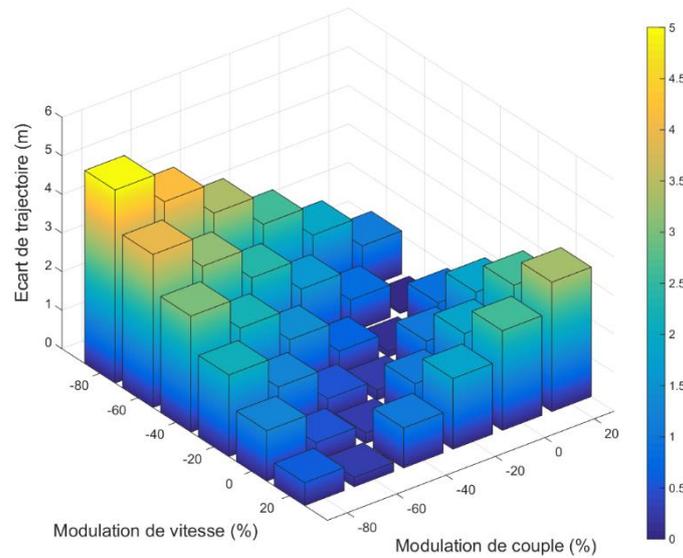
Figure 69 Simulation n°16 (a) et n°21 (b) de la Configuration n°3 du cas d'accident n°1

Après un contrôle visuel des deux trajectoires simulées (Figure 69) nous décidons d'écartier la simulation n°21 car dès le départ l'association de la modulation de couple et de vitesse génère une trajectoire qui coupe largement la voie de gauche, ce qui n'a pas été le cas au vue des témoignages recueillis par l'équipe d'enquêteur EDA.

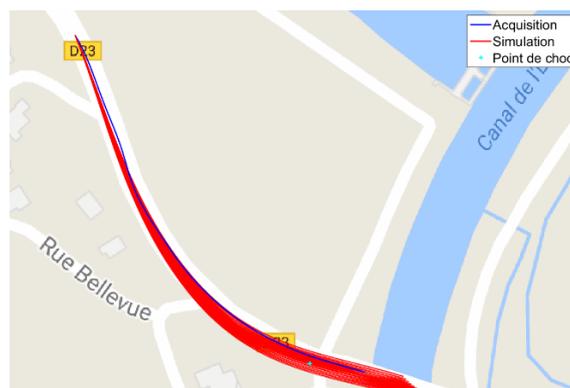
A l'issu du contrôle visuel des combinaisons restantes, il en reste 2 avec des variations de vitesse allant de +10% à +15% et des variations de couple allant de -15% à -20%. Afin de préciser les résultats nous procédons au lancement d'une 4^{ème} vague de simulation.

d. Configuration n°4

Cette fois nous avons donc choisi de faire varier le couple sur l'intervalle -20% -15% avec un pas de 1% et la vitesse sur une plage de +10% +15% avec un pas de 1%. Cela représente 36 combinaisons possibles.



(a)



(b)

Figure 70 Minimisation de la fonction d'évaluation (a) et trajectoires simulées (b) pour la Configuration n°4 du cas d'accident n°1

La Figure 70 (a) présente la fonction d'évaluation qui minimisent l'écart et la Figure 70 (b) l'ensemble des trajectoires simulées. Nous pouvons noter que les écarts entre les trajectoires simulées et le point de choc ainsi que la largeur du faisceau de courbe diminuent fortement. La matrice des résultats (Figure 71) permet de supprimer les combinaisons où l'écart entre le point de choc et la trajectoire simulée est supérieur à 1.5 mètres. Les combinaisons où la trajectoire simulée passe à gauche du point de choc sont également écartées. Sur les 36 combinaisons il en reste 8. Un tri visuel permet de distinguer les trajectoires aberrantes et réduire à 3 le nombre de combinaison possible pour des modulations de vitesse allant de +12% à +14% et de couple allant de -16% à -18%. Après

l'analyse des résultats de cette 4^{ème} vague de simulation nous estimons que les résultats sont suffisamment précis et qu'il n'est pas nécessaire de restreindre encore le champ des possibilités.

6. Conclusion

Précédemment nous avons mis au point une méthode dont le but est d'analyser la phase de pré-choc d'un accident de type perte de contrôle en virage. Pour cela il a fallu faire varier les entrées du modèle que sont le couple exercé sur le guidon et la vitesse de passage. Au total quatre vagues de simulation ont été nécessaires. La première a pour but de déterminer en première intention les combinaisons envisageables, la deuxième et la troisième d'affiner et la quatrième de conclure. Pour chacune des quatre combinaisons, une analyse des résultats de simulation est menée. Elle se base aussi bien sur l'étude de critères dynamiques propres au véhicule que sur une analyse visuelle des différentes trajectoires calculées.

Pour la première configuration nous avons fait varier le couple et la vitesse du passage de référence de -80% à +80%, pour la deuxième nous avons restreint les variations entre -30% et +30% pour le couple et -10% et +50% pour la vitesse. Quant à la troisième, nous avons fait varier le couple entre -25% et +5% et la vitesse entre +5% et +35%, et pour la quatrième et dernière configuration, le couple varie de -15% à -20% et la vitesse de +10% à +15%. Après analyse des résultats de simulation nous pouvons conclure que la configuration la plus probable pour cet accident, est un couple compris entre -16% et -18% et une vitesse entre +12% et +14% par rapport à l'acquisition faite avec la moto instrumentée lors du passage de référence.

En conclusion, on peut estimer la vitesse d'approche comprise entre 107 et 109 km/h. Au vu des éléments, on peut penser que le conducteur s'est probablement laissé surprendre par le virage dont le rayon de courbure diminue car il n'a pas appliqué un couple suffisamment important pour franchir ce virage compte tenu de sa vitesse d'approche.

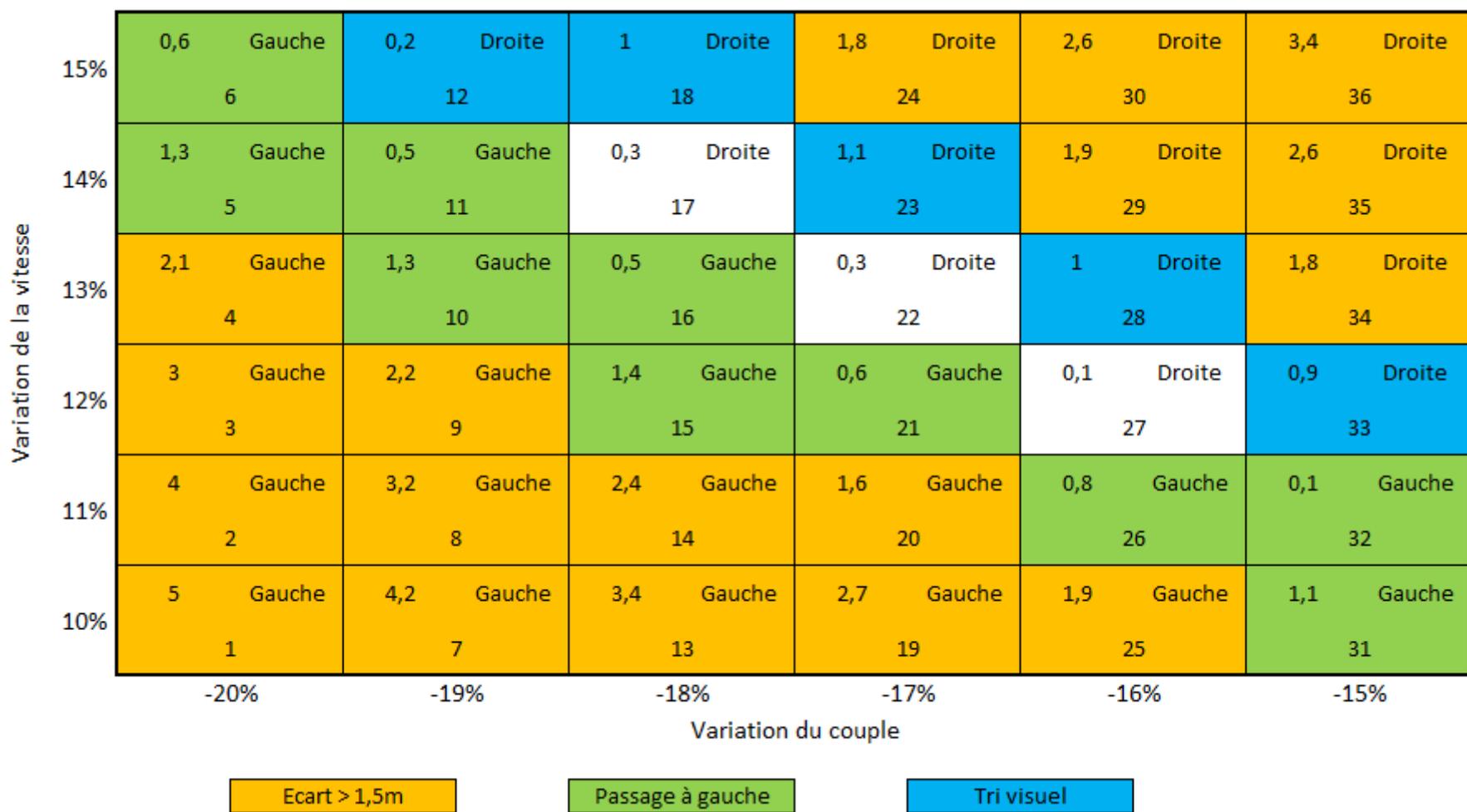


Figure 71 Matrice des résultats de la Configuration n°4 du cas d'accident n°1

7. Observations dynamique

Dans ce paragraphe nous allons nous intéresser à la dynamique du véhicule. Nous avons vu précédemment qu'à la fin des simulations il restait 3 combinaisons possibles. La première a comme modulation -18% sur le couple et +14% sur la vitesse, la deuxième a une modulation de -17% et +13% respectivement sur le couple et la vitesse et pour la troisième, le couple est diminué de 16% et la vitesse augmentée de 12% par rapport au passage de référence. Nous avons donc choisi la deuxième modulation afin d'étudier les paramètres liés à la dynamique du véhicule et notamment aux pneumatiques.

Afin de mieux comprendre la dynamique nous avons placé quatre points répartis sur la trace GPS comme on peut le voir sur la Figure 72. La Figure 73 reprend les entrées du modèle à savoir la vitesse et le couple appliqué par le conducteur sur le guidon, telles qu'elles ont été acquises et modulées comme défini lors de la reconstruction de l'accident. La Figure 74 représente les sorties du modèle, l'angle de roulis et les forces et moments pneumatiques. Ces dernières sont directement issues de notre modèle et notamment du modèle de pneumatiques de Pacejka implémenté avec SimMechanics.

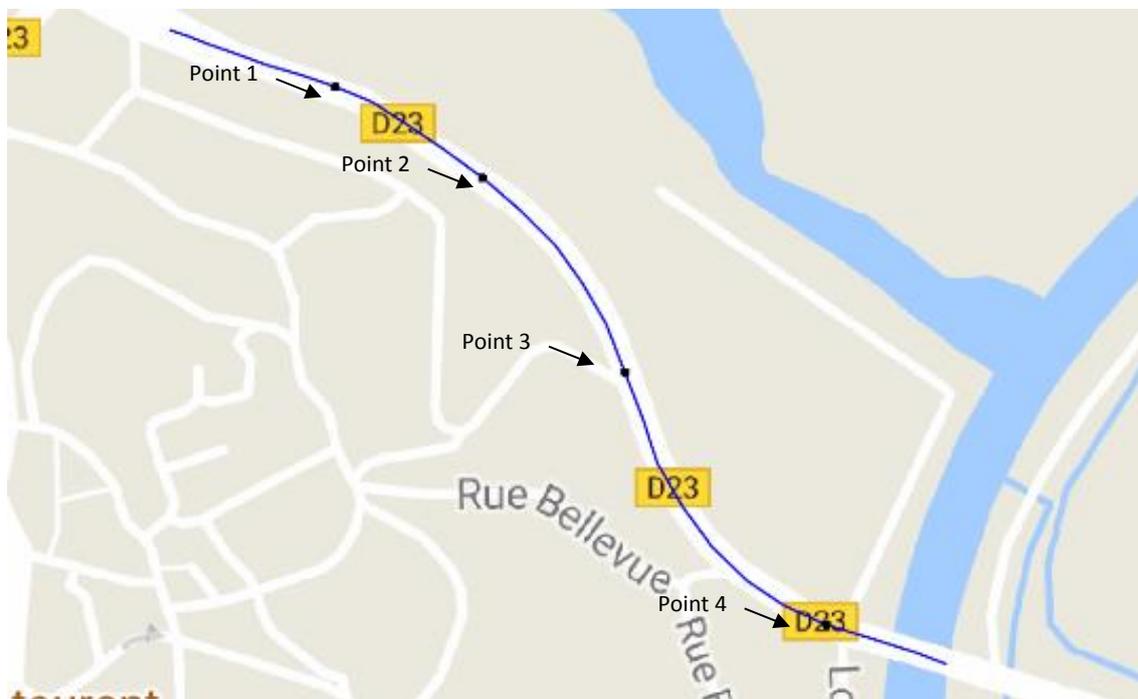
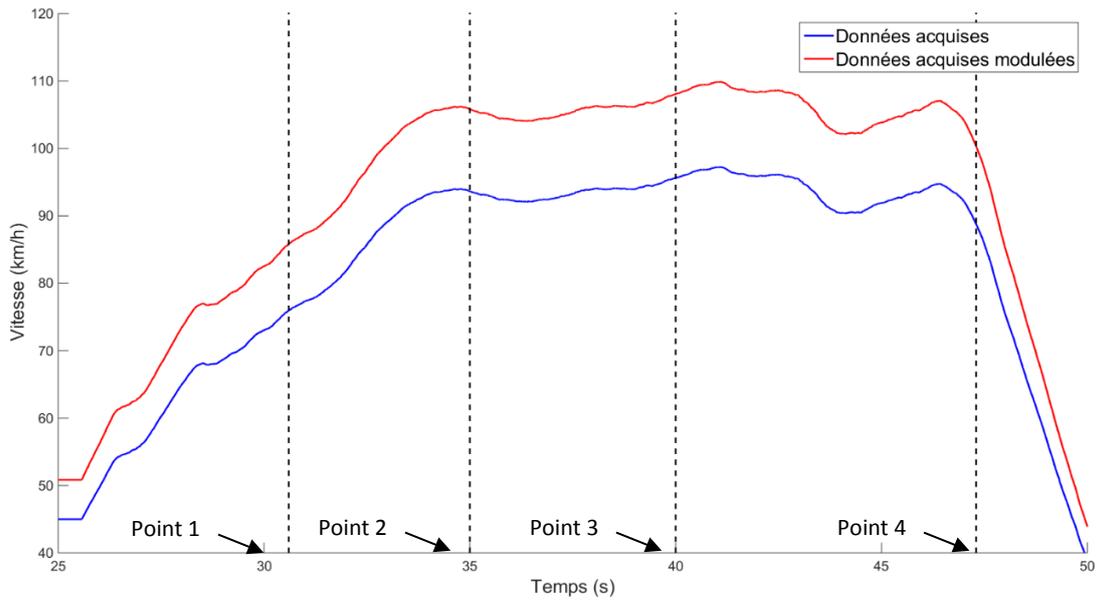


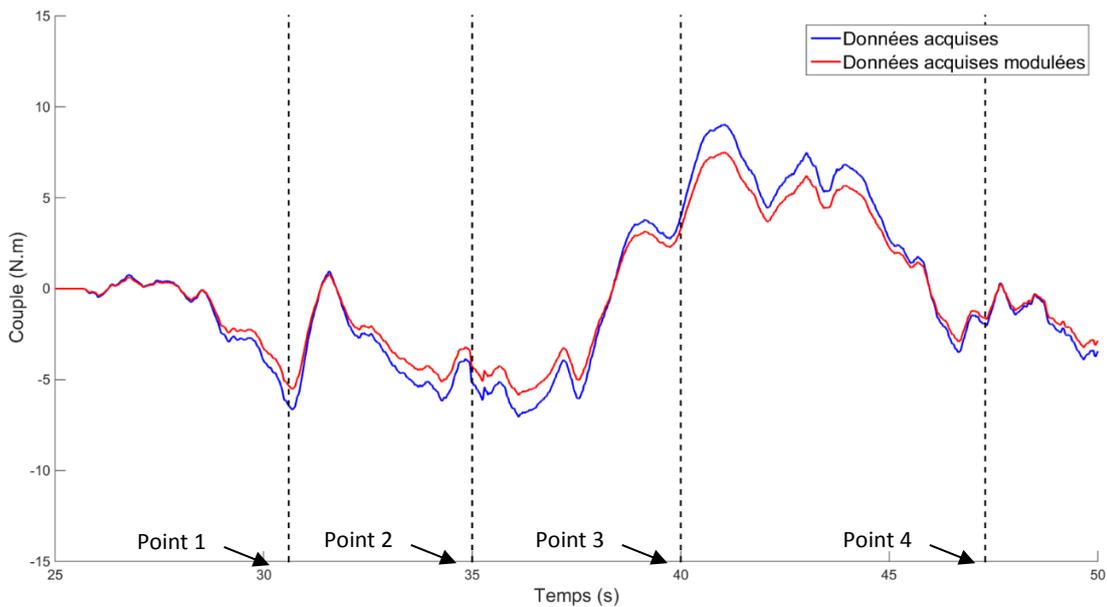
Figure 72 Répartition des points GPS pour l'étude de la dynamique de l'accident n°1

Tableau 14 Répartition des points pour l'étude de la dynamique du cas d'accident n°1

Points	Caractéristiques
Point 1	Approche
Point 2	Milieu de courbe
Point 3	Changement de courbure du virage
Point 4	Point de choc



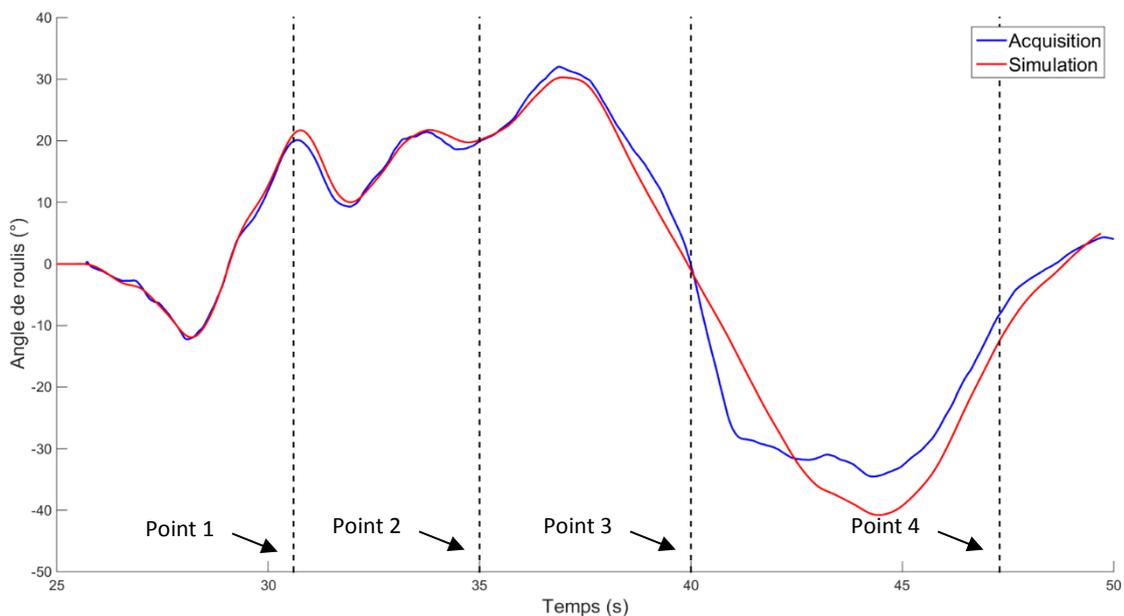
(a)



(b)

Figure 73 Entrées de vitesse (a) et de couple (b) originales et modulées

Comme on peut le voir sur la Figure 73, entre les points 1 et 4 la vitesse oscille entre 85 et 109 km/h. Le couple, quant à lui, varie entre -5.5 et 7.5 N.m. Le couple et la vitesse sont des entrées du modèle, si nous nous intéressons maintenant aux sorties, nous pouvons d'abord observer sur la Figure 74 (a) que l'angle de roulis varie entre -40° et 37° . Si l'on s'intéresse aux efforts des pneumatiques, on peut observer sur la Figure 74 (b) que la force longitudinale F_x est quasiment constante et proche de 0. La force latérale, F_y varie entre environ -1200N et 1000N. On peut observer une légère différence entre le pneumatique avant et le pneumatique arrière. Cela peut être expliqué par la répartition des masses entre l'avant et l'arrière. En effet, si l'on observe l'effort vertical F_z , on se rend compte que sa valeur est quasiment constante et que l'effort sur le pneu arrière est plus importante (environ 1930N à l'arrière et 1520N à l'avant). Cela corrobore bien le fait que sur une moto routière la répartition des masses est plus importante sur l'arrière.



(a)

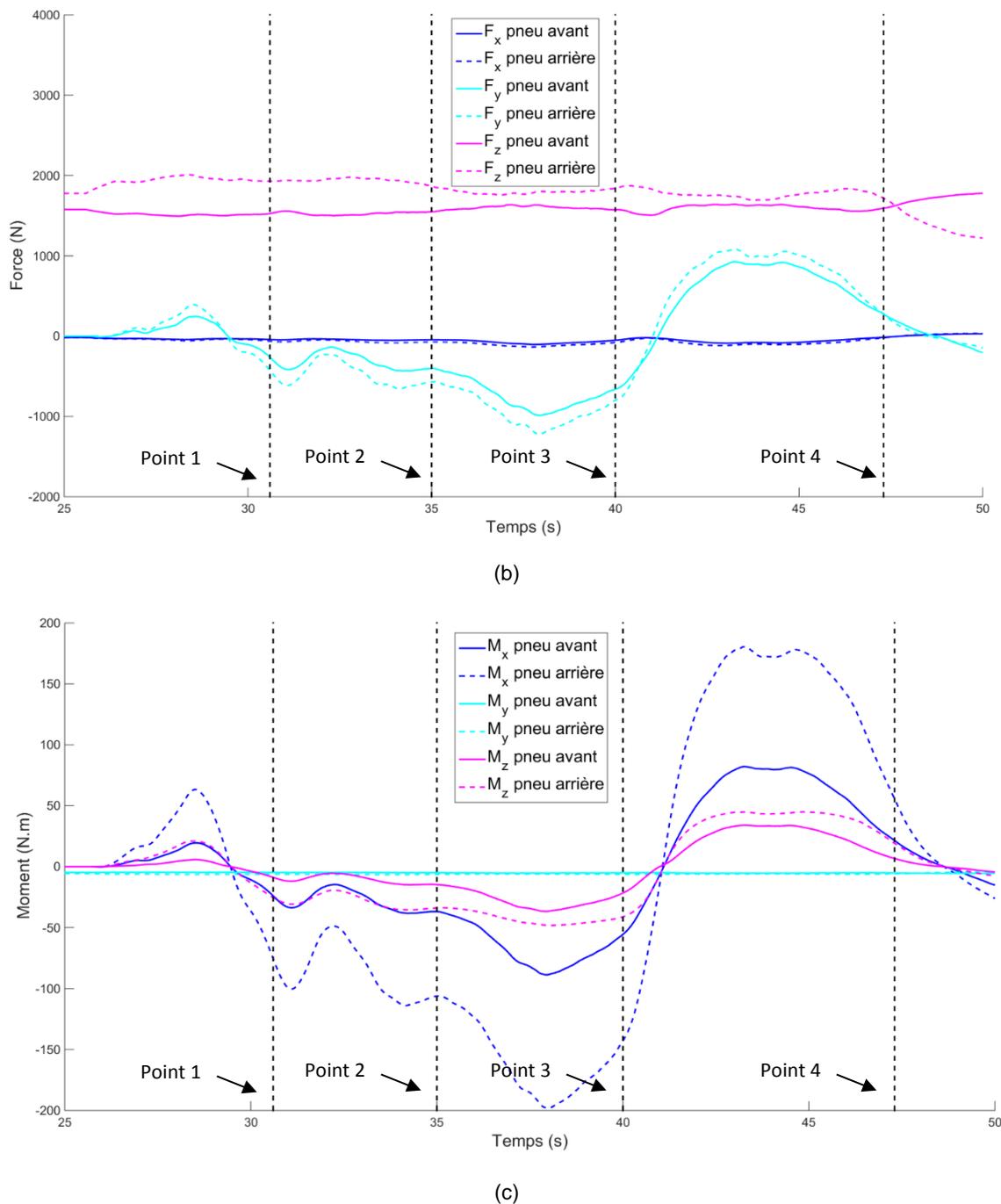


Figure 74 Angle de roulis (a), forces (b) et moments (c) pneumatiques relatifs à la simulation de l'accident n°1

Concernant les moments induits par l'effet des pneumatiques, on peut observer sur la Figure 74 (c) que le moment autour de l'axe y (transversal) reste constant et quasi nul du fait que F_x est constant et quasi nul. Le moment de renversement M_x varie entre -88N.m et 82N.m pour la roue avant et entre -198N.m et 180N.m pour la roue arrière. Concernant le moment

d'auto-alignement M_z , on peut observer un minimum de -46 N.m pour la roue arrière et -36 N.m pour la roue avant. Les valeurs maximales sont de 44 N.m pour la roue arrière et 34 N.m pour la roue avant. On peut également noter une certaine symétrie au niveau des efforts et des moments des pneumatiques. Les résultats observés coïncident avec ce que l'on peut trouver en bibliographie [22]. On peut noter une différence entre la phase d'approche qui est peu sollicitante par rapport à la phase d'urgence. L'analyse dynamique des données issues du modèle permet de mieux comprendre la phase de pré-choc.

IV. Cas n°2 : Perte de contrôle en courbe suite à freinage d'urgence.

1. Présentation du cas

Ce cas d'accident implique une voiture et une moto, ces deux véhicules sont entrés en collision une fois la moto au sol. L'accident a eu lieu dans un carrefour en sortie d'agglomération un jour de printemps aux alentours de 13h, la météo était ensoleillée. La moto est une Suzuki 600 Bandit comptabilisant 5000 kilomètres au compteur et la voiture une Fiat Marea totalisant 105000 kilomètres. Les deux véhicules sont en bon état. Le conducteur de la moto est âgé d'une trentaine d'année, il possède le véhicule et le permis moto depuis 9 mois. La conductrice de la voiture a une cinquantaine d'année et possède le permis voiture depuis plus de 30 ans. La voiture vient de la route arrivant de la droite sur le plan (Figure 77) et la moto de la gauche. La route est étroite et la visibilité réduite comme on le voit sur la Figure 75.



(a)



(b)

Figure 75 Visibilité de la voiture (a) et de la moto (b) en approche du lieu de l'accident

L'objectif de la reconstruction consistera à répondre aux questions suivantes : Le conducteur de la moto a-t-il freiné de manière excessive et bloquer la roue, a-t-il eu une mauvaise maîtrise de son véhicule en terme de vitesse ou d'action sur le guidon ? Pour répondre à ces différentes questions, nous allons utiliser le modèle développé au cours de cette thèse en suivant la méthodologie qui a été mise au point. Cela commence par l'analyse de l'accident et des passages sur les lieux de l'accident à l'aide de la moto instrumentée.

2. Analyse de l'accident

Le conducteur de la moto déclare arriver à environ 50 km/h, s'engager vers la route d'où viens la voiture et se faire surprendre par cette dernière qui "empiète sur sa voie". Il précise freiner fort, bloquer la roue avant et passer par-dessus la moto. La conductrice de la voiture n'a plus de souvenir quant à sa position sur la chaussée mais précise qu'elle roulait à environ 50 km/h et dit avoir pilé en voyant la moto.

Des traces de grattage et de ripage ont été laissées par la moto comme on peut le voir sur la Figure 78. La voiture n'a elle laissé aucune trace.



Figure 76 Positions finales des véhicules sur la chaussée (marquage au sol en rouge)

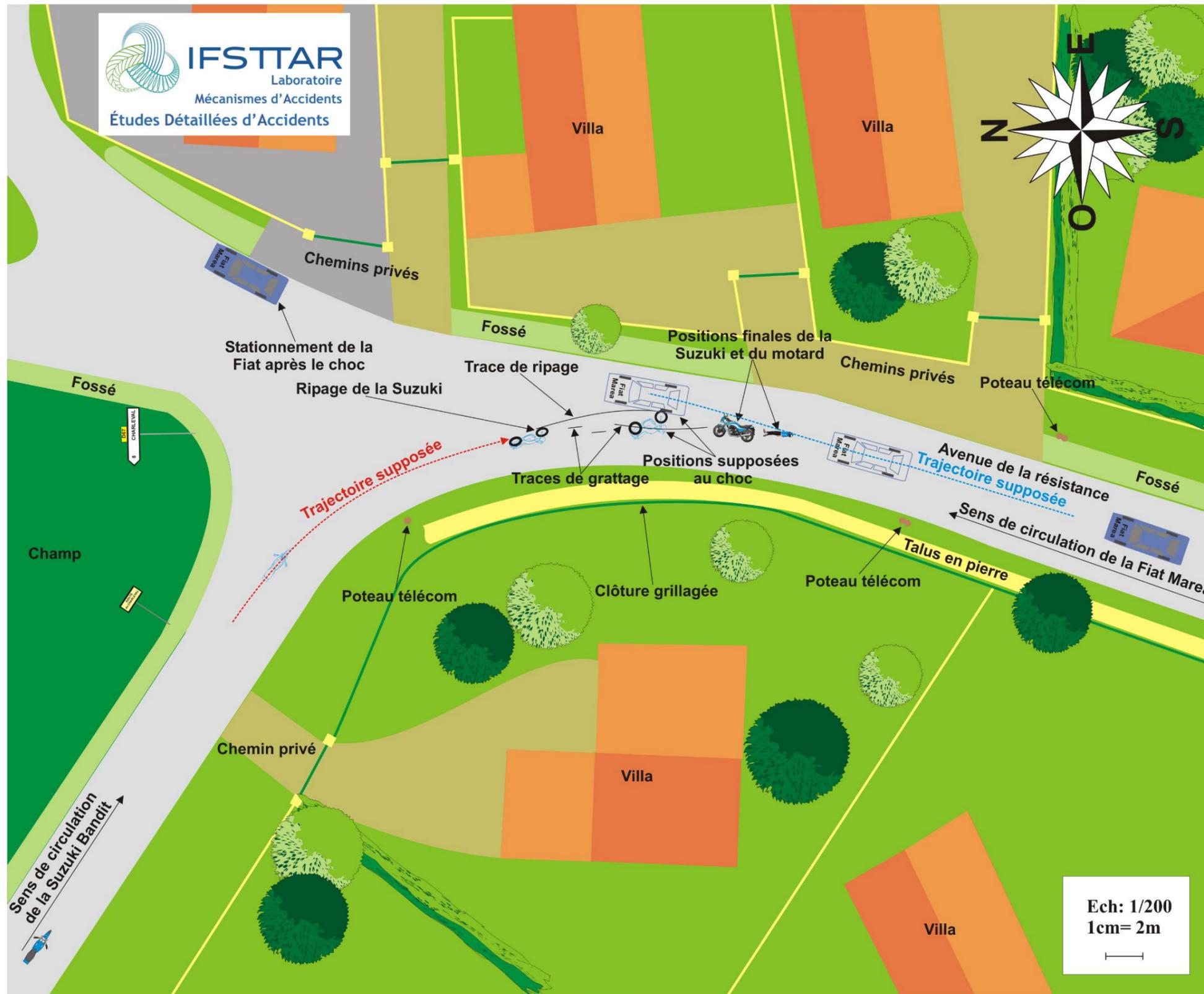


Figure 77 Plan de l'accident n°2



Figure 78 Traces sur la chaussée

Le contact entre les deux véhicules a eu lieu lors du second choc pour la moto puisque le 1^{er} correspond à la chute sur la chaussée. La reconstruction cinématique réalisée par les EDA propose le scénario suivant :

- 1.78 seconde avant impact, rupture, perception de la situation de conflit par le conducteur de 2RM, vitesse de 48 km/h
- 0.98 seconde avant impact, début du freinage d'urgence, vitesse de 44 km/h
- 0.78 seconde avant impact, début de la chute, vitesse 39 km/h

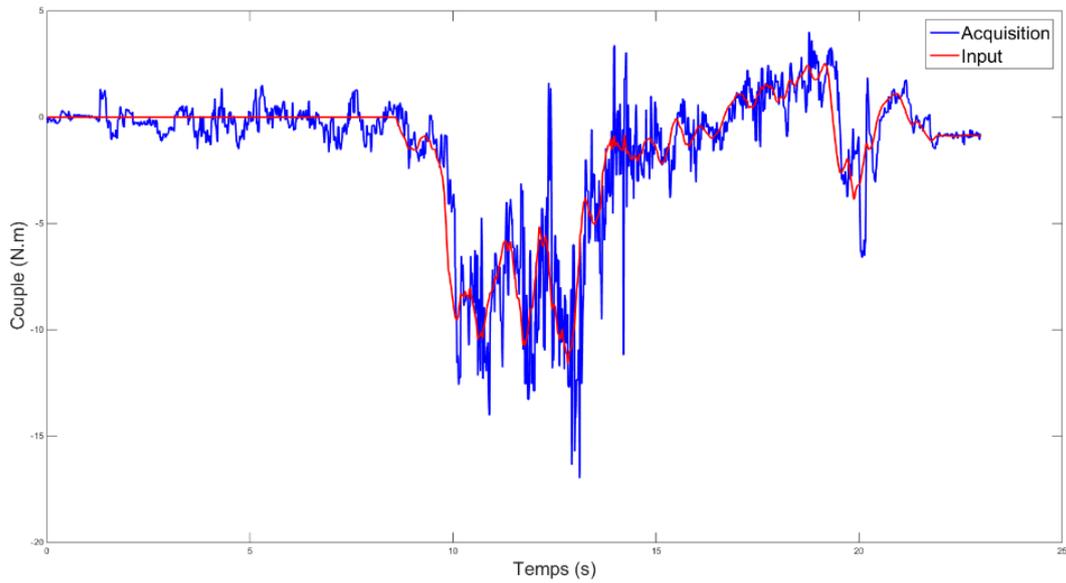
3. Passage sur les lieux de l'accident

A l'aide de la moto instrumentée, nous sommes passés sur les lieux de l'accident. Afin de disposer d'un panel de données suffisamment complet, nous avons établi un plan d'expérience. Nous avons choisi de réaliser les passages avec différentes vitesses de consigne, 30, 40, 45 et 50 km/h. Chaque essai est répété 3 fois, ce qui fait au total 12 passages.

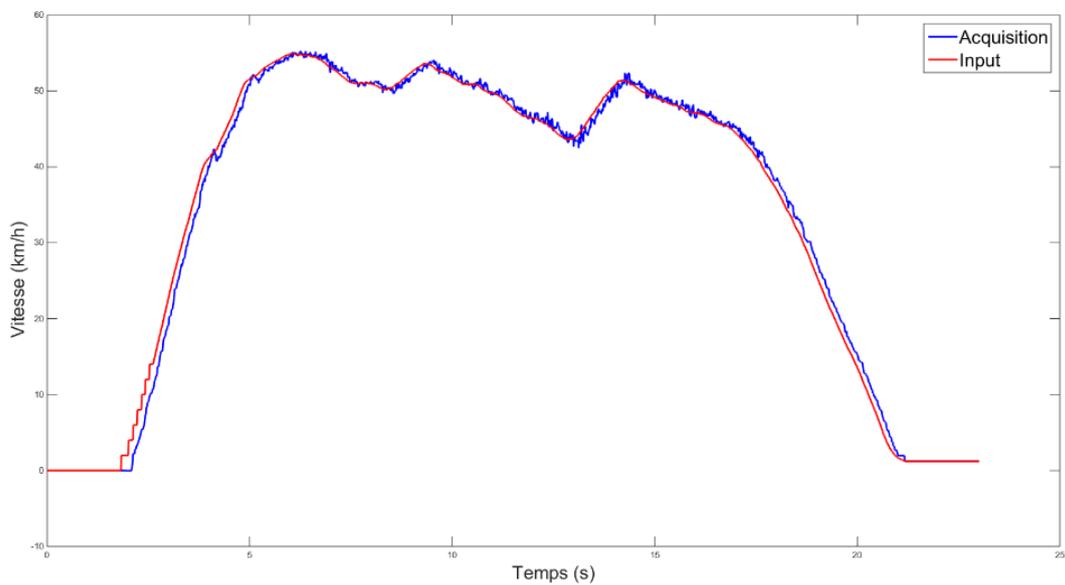
4. Validation des signaux acquis

Au vu des conditions de circulation, des déformations et des traces au sol, la vitesse au moment de la chute est faible. Nous avons donc choisi un passage à 50 km/h comme base

de travail. Nous avons traité les données acquises afin de pouvoir les injecter dans le modèle. Sur la Figure 79, sont tracés les données acquises et les inputs de couple (a) et de vitesse (b). Les inputs correspondent aux données brutes traitées et recalées.



(a)



(b)

Figure 79 Input de couple (a) et de vitesse (b)

Ces données sont injectées dans le modèle sans aucune modulation ou pondération afin de vérifier que la base de travail est bonne et que le modèle simule correctement le passage réalisé.



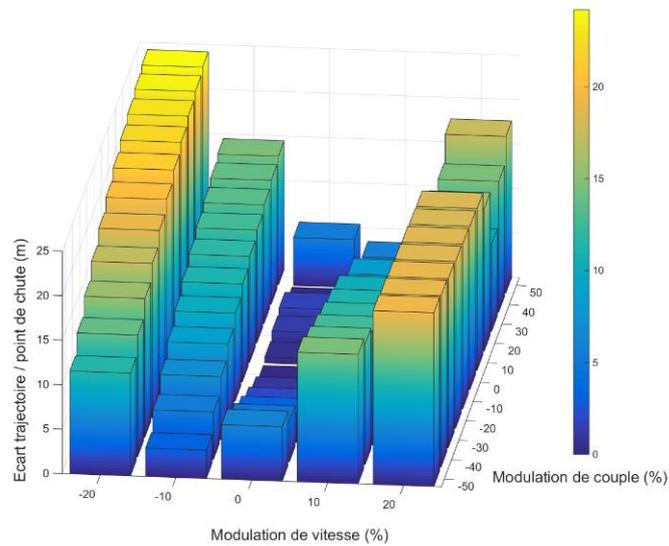
Figure 80 Trajectoire simulés sans modification des inputs

Les résultats de la simulation sont présentés dans la Figure 80. Comme nous pouvons l'observer, les trajectoires acquise et simulée se superposent bien. Nous pouvons donc considérer que ce passage de référence représente une bonne base de travail et que par conséquent ces inputs peuvent être modulés afin de procéder au reste du travail.

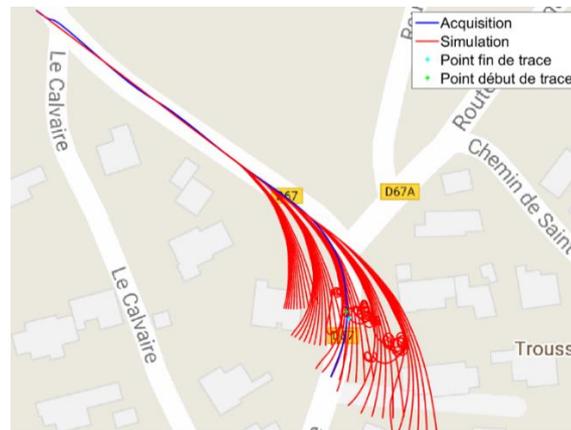
5. Modulation des paramètres d'entrée du modèle

a. Configuration n°1

Comme pour le cas précédent, il est important pour la première vague de simulation de balayer un champ assez large. Pour la première configuration nous avons choisi de faire varier le couple de -50% à +50% avec un pas de 10% et la vitesse de -20% à +20% avec un pas de 10%. Pour cette première vague de simulation, nous ne faisons pas varier les paramètres propres au freinage afin de se consacrer sur la trajectoire empruntée par la moto juste avant de chuter. Au total, 55 simulations ont été lancées. La Figure 81 représente l'ensemble des trajectoires simulées pour la configuration n°1. On peut observer cinq faisceaux de courbes qui correspondent aux cinq modulations de vitesses et dans chacun d'entre eux, onze courbes associées aux variations de couple.



(a)



(b)

Figure 81 Minimisation de la fonction d'évaluation (a) et ensemble des trajectoires simulées (b) pour la Configuration n°1 du cas d'accident n°2

La Figure 82 représente le tableau des résultats de la première série de simulations. Dans ce dernier, sont recensés le numéro des simulations leurs écarts entre la trajectoire et le point de chute, la vitesse du véhicule au moment de passer le point de chute, l'écart entre le point auquel la moto chute lors de la simulation et le point de chute relevé par l'équipe EDA, la position de la trajectoire simulée par rapport au point de chute. On peut également voir apparaître dans ce tableau pour chaque simulation les modulations des entrées du modèle à savoir le couple, la vitesse, l'instant de début de freinage, la durée du freinage et la décélération.

Nous pouvons alors analyser les résultats obtenus. Dans un premier temps, nous écartons toutes les combinaisons où l'écart entre la trajectoire simulée et le point de chute est supérieur à 3 mètres. Dans un second temps, sont écartées les combinaisons où la moto a chuté avant d'atteindre le point de chute relevé sur le terrain. Il reste alors 6 possibilités sur les 55 du départ pour des valeurs de couple allant de -30% à +20% et des valeurs de vitesse ne variant pas.

Une fois ce travail de sélection terminé, nous pouvons restreindre le champ des solutions et procéder au lancement d'une seconde vague de simulations plus ciblée et plus précise.

Num	Ecart_choc	Vitesse_choc	Ecart_chute	Sens	Couple	Vitesse	Deb_frein	Durée_frein	Decel
1	11,55	38	/	Gauche	0,5	0,8	0	0	0
2	3,19	44	/	Gauche	0,5	0,9	0	0	0
3	6,13	51	/	Droite	0,5	1	0	0	0
4	14,55	49	/	Droite	0,5	1,1	0	0	0
5	19,54	56	/	Droite	0,5	1,2	0	0	0
6	13,66	38	/	Gauche	0,6	0,8	0	0	0
7	5,32	44	/	Gauche	0,6	0,9	0	0	0
8	4,57	51	/	Droite	0,6	1	0	0	0
9	13,58	50	/	Droite	0,6	1,1	0	0	0
10	19,26	56	/	Droite	0,6	1,2	0	0	0
11	15,59	38	/	Gauche	0,7	0,8	0	0	0
12	7,1	44	/	Gauche	0,7	0,9	0	0	0
13	2,44	51	/	Droite	0,7	1	0	0	0
14	12,71	50	/	Droite	0,7	1,1	0	0	0
15	19,01	56	/	Droite	0,7	1,2	0	0	0
16	17,36	38	/	Gauche	0,8	0,8	0	0	0
17	8,6	45	/	Gauche	0,8	0,9	0	0	0
18	2,08	51	/	Droite	0,8	1	0	0	0
19	11,94	50	/	Droite	0,8	1,1	0	0	0
20	18,77	56	/	Droite	0,8	1,2	0	0	0
21	18,89	38	/	Gauche	0,9	0,8	0	0	0
22	9,89	45	/	Gauche	0,9	0,9	0	0	0
23	1,06	51	/	Droite	0,9	1	0	0	0
24	11,24	51	/	Droite	0,9	1,1	0	0	0
25	18,56	56	/	Droite	0,9	1,2	0	0	0
26	20,21	38	/	Gauche	1	0,8	0	0	0
27	10,98	45	/	Gauche	1	0,9	0	0	0
28	0,15	51	/	Droite	1	1	0	0	0
29	10,56	51	/	Droite	1	1,1	0	0	0
30	18,36	56	11,16	Chute	1	1,2	0	0	0
31	21,33	38	/	Gauche	1,1	0,8	0	0	0
32	11,91	45	/	Gauche	1,1	0,9	0	0	0
33	0,65	51	/	Gauche	1,1	1	0	0	0
34	6,19	10	-10,03	Chute	1,1	1,1	0	0	0
35	18,18	56	9,37	Chute	1,1	1,2	0	0	0
36	22,27	39	/	Gauche	1,2	0,8	0	0	0

37	12,7	45	/	Gauche	1,2	0,9	0	0	0
38	1,4	51	19,48	Chute	1,2	1	0	0	0
39	8,13	4	-11,87	Chute	1,2	1,1	0	0	0
40	16,05	1	-13,15	Chute	1,2	1,2	0	0	0
41	23,02	39	/	Gauche	1,3	0,8	0	0	0
42	13,36	45	/	Gauche	1,3	0,9	0	0	0
43	1,86	49	2,39	Chute	1,3	1	0	0	0
44	2,69	4	-11,5	Chute	1,3	1,1	0	0	0
45	9,82	5	-11,12	Chute	1,3	1,2	0	0	0
46	23,64	39	/	Gauche	1,4	0,8	0	0	0
47	13,94	45	/	Gauche	1,4	0,9	0	0	0
48	0,25	45	-17,01	Chute	1,4	1	0	0	0
49	5,69	6	-10,56	Chute	1,4	1,1	0	0	0
50	14,72	5	-21,63	Chute	1,4	1,2	0	0	0
51	24,18	39	/	Gauche	1,5	0,8	0	0	0
52	14,48	46	/	Gauche	1,5	0,9	0	0	0
53	5,4	-4	-12,67	Chute	1,5	1	0	0	0
54	0,08	-17	-13,41	Chute	1,5	1,1	0	0	0
55	17,59	55	6,74	Chute	1,5	1,2	0	0	0

Ecart_choc > 3m

Chute avant choc

Figure 82 Tableau des résultats de la Configuration n°1 du cas d'accident n°2

b. Configuration n°2

Pour cette deuxième configuration nous avons choisi de faire varier le couple sur l'intervalle -30% +30% avec un pas de 10% et de ne pas faire varier la vitesse. Contrairement à la première configuration, nous allons prendre en compte les paramètres de freinage. Nous définissons le début de freinage entre 13s et 14.4s avec un pas de 0.2s par rapport au début de la simulation. Comme on peut le voir sur la Figure 83, entre 13s et 14.4s la trajectoire est représentée en cyan, nous avons choisi de faire commencer le freinage sur cet intervalle de temps en fonction de la position des traces de ripage et grattage retrouvées sur la chaussée et représentées par des croix rouge et verte. De plus, l'analyse cinématique réalisée par les EDA montre que la voiture peut être perçue par le conducteur de la moto 1.78 seconde avant l'impact. Si on retire alors 1 seconde pour le temps de réaction, le conducteur a freiné au plus tôt à t=13.58s par rapport au début de la simulation.



Figure 83 Représentation spatio-temporelle de la Configuration n°2 du cas d'accident n°2

Quant à la durée du freinage, nous balayons un champ assez large entre 0.1 s et 1.3s avec un pas de 0.2s. La décélération varie entre -6 m/s^2 et -8 m/s^2 avec un pas de 2 m/s^2 . Cela représente 784 combinaisons possibles.

Nous pouvons alors nous intéresser à l'analyse des simulations en étudiant le tableau des résultats (Annexe 4). Dans un premier temps nous écartons toutes les combinaisons où l'écart entre la trajectoire simulée et le point de chute relevé sur le terrain (début des traces de ripage et grattage) est supérieur à 2 mètres. Cela permet d'écarter 293 combinaisons. Dans un second temps, nous mettons de cotés les configurations où la moto chute au moins 2 mètres avant d'atteindre le début des traces, ce tri permet de retirer 162 combinaisons. Dans un troisième temps nous retirons les modulations où la moto chute 2 mètres après le début des traces de grattage, 167 combinaisons sont encore évincées. Dans un quatrième temps, les 106 modulations des entrées du modèle qui n'entraînent pas de chute sont écartées. Il reste alors 21 combinaisons possibles pour des modulations de couple entre -10% et $+10\%$, le début du freinage à 14.2s, une durée de freinage comprise entre 0.1s et 1.3s et une décélération de -8 m/s^2 .

c. Configuration n°3

Nous avons choisi de faire varier le couple sur l'intervalle -15% +15% avec un pas de 5% et de ne pas faire varier la vitesse. Nous définissons le début de freinage à 14.2s. En effet, nous avons vu lors de l'analyse des résultats de la configuration précédente qu'une durée de freinage de 0.1s suffit à entrainer systématiquement une chute. Nous ferons donc varier la durée du freinage entre 0.05s et 0.1s avec un pas de 0.05s. La décélération quant à elle, sera de -8 m/s^2 . Au total 14 simulations vont être lancées. L'ensemble des trajectoires simulées est présenté sur la Figure 84.

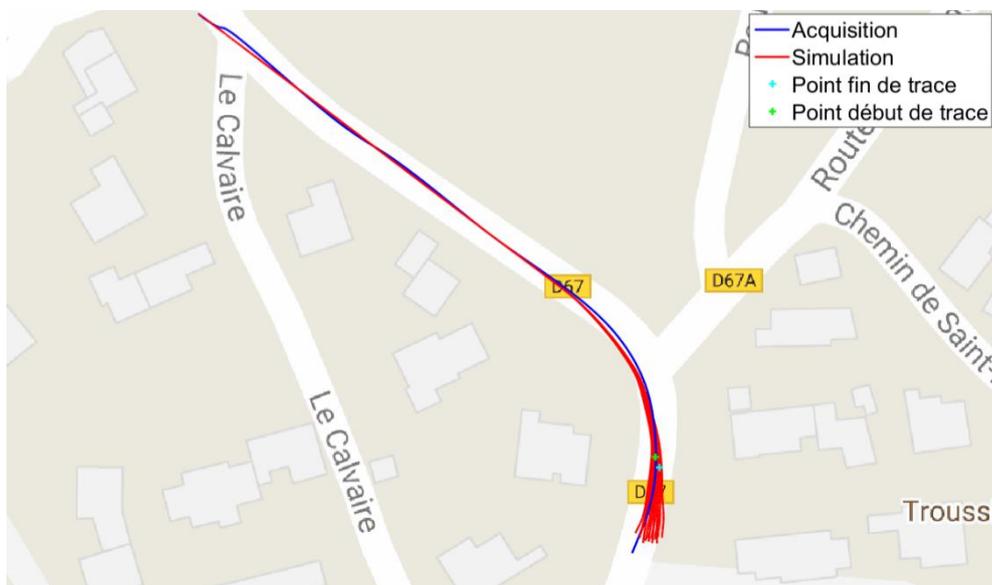


Figure 84 Ensemble des trajectoires simulées pour la Configuration n°3 du cas d'accident n°2

Nous pouvons alors analyser les résultats de simulation à l'aide du tableau de résultats (Figure 85). Dans un premier temps, nous mettons de côté les combinaisons où l'écart entre la trajectoire simulée et le point de chute relevé sur le terrain est supérieur à 0.5 mètre. Cela permet d'écarter 10 combinaisons. Dans un second temps, nous éliminons les configurations où la moto chute plus de 0.5 mètre avant ou après le début des traces, ce tri fait ressortir 4 combinaisons qui ont déjà été éliminées précédemment. Dans un troisième temps, nous procédons à un contrôle visuel des trajectoires qui ne permet pas d'éliminer de combinaison. Il reste alors 4 combinaisons possibles pour des modulations de couple entre +0% et +5%, le début du freinage est à 14.2 s, une durée de freinage comprise entre 0.05s et 0.1s et une décélération de -8 m/s^2 .

Num	Ecart_choc	Vitesse_choc	Ecart_chute	Sens	Couple	Vitesse	Deb_frein	Durée_frein	Decel
1	1,55	51	-0,22	Chute	0,85	1	14,2	0,05	-8
2	1,55	51	-0,22	Chute	0,85	1	14,2	0,1	-8
3	1,06	51	-0,08	Chute	0,9	1	14,2	0,05	-8
4	1,06	51	-0,08	Chute	0,9	1	14,2	0,1	-8
5	0,59	51	0,07	Chute	0,95	1	14,2	0,05	-8
6	0,59	51	0,07	Chute	0,95	1	14,2	0,1	-8
7	0,15	51	0,25	Chute	1	1	14,2	0,05	-8
8	0,15	51	0,25	Chute	1	1	14,2	0,1	-8
9	0,26	51	0,38	Chute	1,05	1	14,2	0,05	-8
10	0,26	51	0,38	Chute	1,05	1	14,2	0,1	-8
11	0,65	51	0,58	Chute	1,1	1	14,2	0,05	-8
12	0,65	51	0,58	Chute	1,1	1	14,2	0,1	-8
13	1,03	51	0,75	Chute	1,15	1	14,2	0,05	-8
14	1,03	51	0,75	Chute	1,15	1	14,2	0,1	-8

Ecart_choc > 0,5m

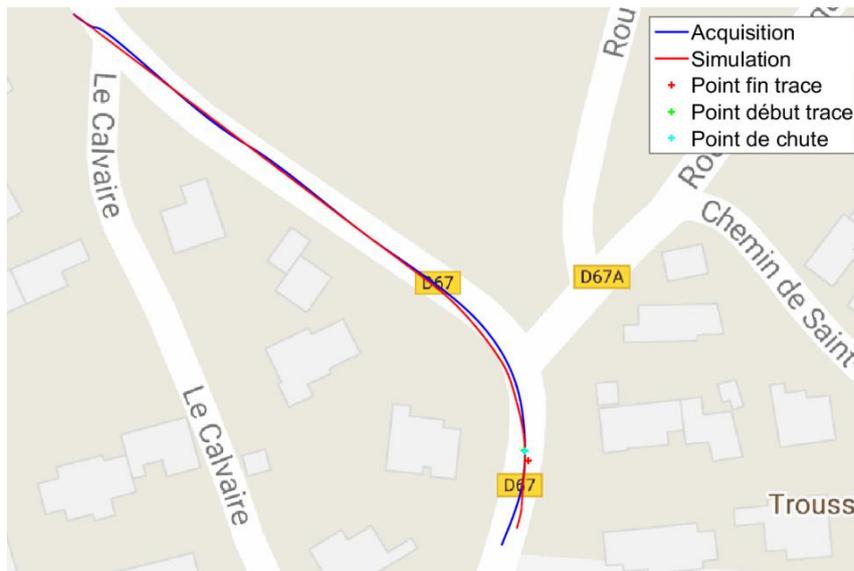
|Ecart_chute| > 0,5

Figure 85 Tableau des résultats de la configuration n°3 du cas d'accident n°2

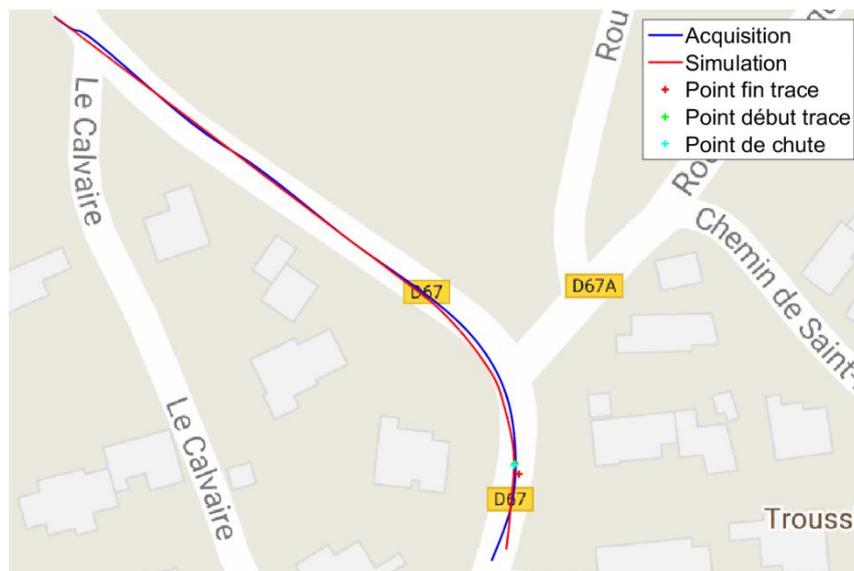
6. Analyse des résultats de simulation

Afin de mieux comprendre cet accident, trois vagues de simulations auront été nécessaires. Pour la première, nous avons uniquement fait varier le couple et la vitesse afin de déterminer quelles combinaisons permettaient de passer sans chuter par le point de chute qui correspond au début des traces de ripage. Pour cela, nous avons lancé 55 simulations avec le couple qui varie entre -50% et +50% avec un pas de 10% et la vitesse qui varie entre -20% et +20% avec un pas de 10%. La seconde vague de simulation a permis de restreindre les trajectoires envisageables mais aussi de déterminer les principales caractéristiques du freinage lors de l'accident. Pour cela, 784 simulations ont été réalisées avec des modulations de couple comprises entre -30% et +30% avec un pas de 10% et aucune modulation de la vitesse. Quant au freinage, nous avons fait varier l'instant où débute le freinage entre 13s et 14.4s avec un pas de 0.2s, la durée du freinage entre 0.1s et 1.3s avec un pas de 0.2s et l'intensité du freinage entre -6 m/s² et -8 m/s². Une troisième vague de simulations a été nécessaire pour conclure. Au total, 14 simulations avec une variation du couple entre -15% et +15% avec un pas de 5%, aucune variation de vitesse, un début de freinage à 14.2s, une

durée de freinage comprise entre 0.05s et 0.1s avec un pas de 0.05s et une décélération constante de -8 m/s^2 ont permis de faire ressortir 4 solutions possibles. Pour ces solutions envisageables le couple varie entre +0% et +5% et la vitesse avant freinage est la même que celle acquise lors des passages sur les lieux de l'accident c'est-à-dire 51 km/h. Concernant le freinage, il a lieu à 14.2s avec une intensité de -8 m/s^2 , la durée varie entre 0.05s et 0.1s mais 0.05s suffisent à engendrer la chute. Donc il reste deux combinaisons possibles présentées Figure 86.



(a)



(b)

Figure 86 Trajectoires des deux solutions possibles pour l'accident n°2

Nous pouvons maintenant répondre aux questions que nous nous posions, le conducteur de la moto était à priori bien placé dans sa voie puisqu'il a appliqué un couple similaire voire plus important que celui enregistré lors des passages pour une vitesse équivalente. Le manque de visibilité sur cette route a dû surprendre le conducteur de la moto qui a freiné de manière intensive ce qui a provoqué un blocage de roue et entraîné la chute.

7. Observations dynamiques

Dans ce paragraphe nous allons nous intéresser à la dynamique du véhicule. Pour cela nous avons choisi parmi les quatre configurations restantes, la numéro 7 c'est-à-dire, aucune modulation sur le couple et la vitesse, un début de freinage à l'instant $t=14.2s$, une durée de freinage de $0.05s$ et une intensité de freinage de $-8 m/s^2$.

Afin de mieux comprendre la dynamique nous avons placé quatre points répartis sur la trace GPS comme on peut le voir sur la Figure 88, ces points sont choisis de manière à être représentatifs des différentes phases de l'accident (Tableau 15)

Nous avons réalisé grâce au logiciel Aras 360 HD une animation cinématique de l'accident avec les éléments définis lors de la reconstruction. La Figure 87 montre la scène telle que l'a vu le conducteur de la moto. On voit bien grâce à l'animation, que le conducteur découvre au dernier moment la voiture à cause des masques à la visibilité présents sur les lieux.



Figure 87 Animation du cas d'accident n°2, point de vue conducteur de la moto

Tableau 15 Répartition des points pour l'étude de la dynamique du cas d'accident n°2

Points	Caractéristiques
Point 1	Approche
Point 2	Début de perception de la voiture
Point 3	Début de freinage
Point 4	Point de choc

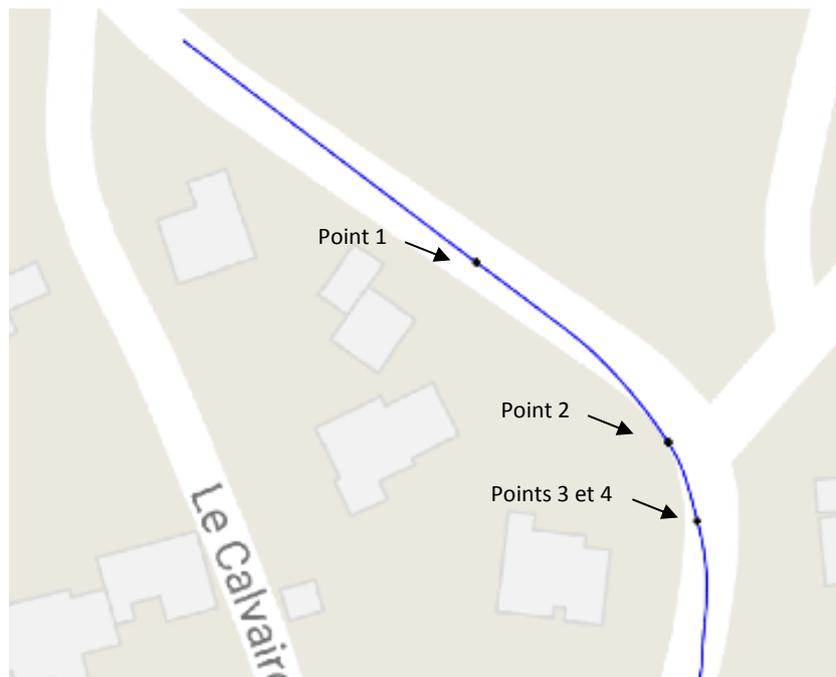
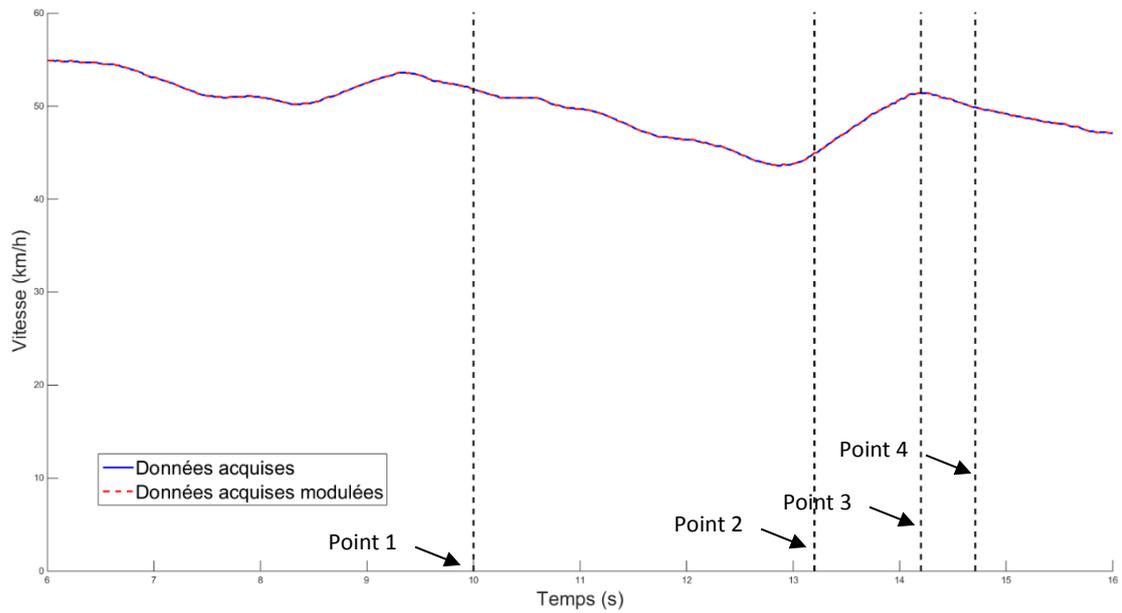
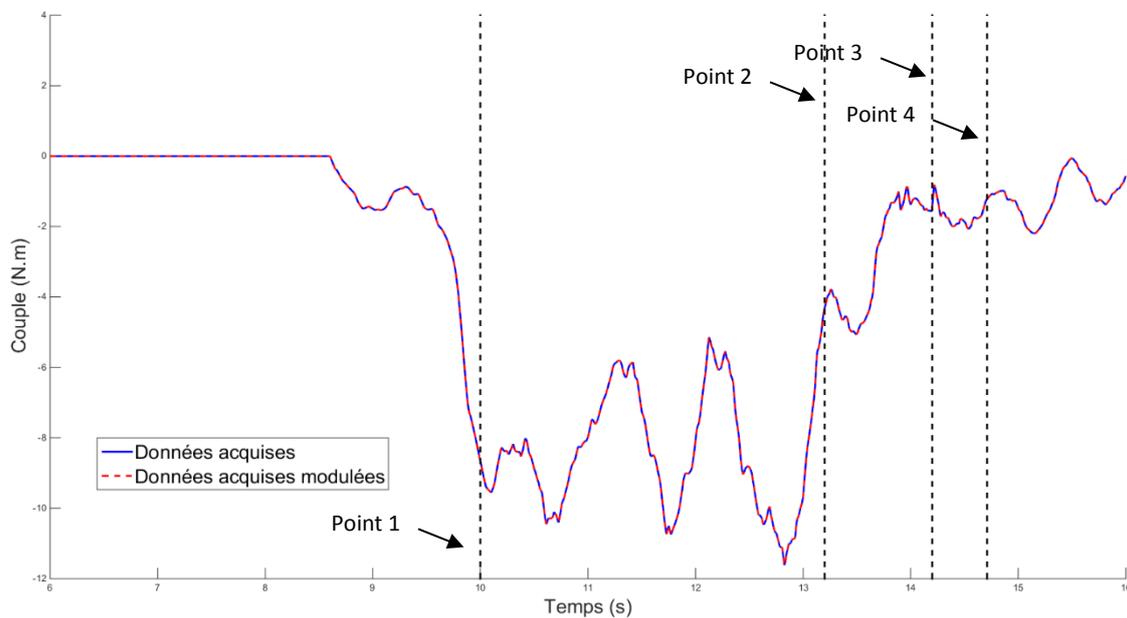


Figure 88 Repérage des points GPS pour l'étude de la dynamique de l'accident n°2

La Figure 89 reprend les entrées du modèle à savoir la vitesse et le couple appliqué par le conducteur sur le guidon, telles qu'elles ont été acquises et modulées initialement. La Figure 90 représente les sorties du modèle, la vitesse de la roue avant, l'angle de roulis, les forces et moments pneumatiques et l'angle de dérive. Ces dernières sont directement issues du modèle de pneumatiques de Pacejka implémenté avec SimMechanics.



(a)

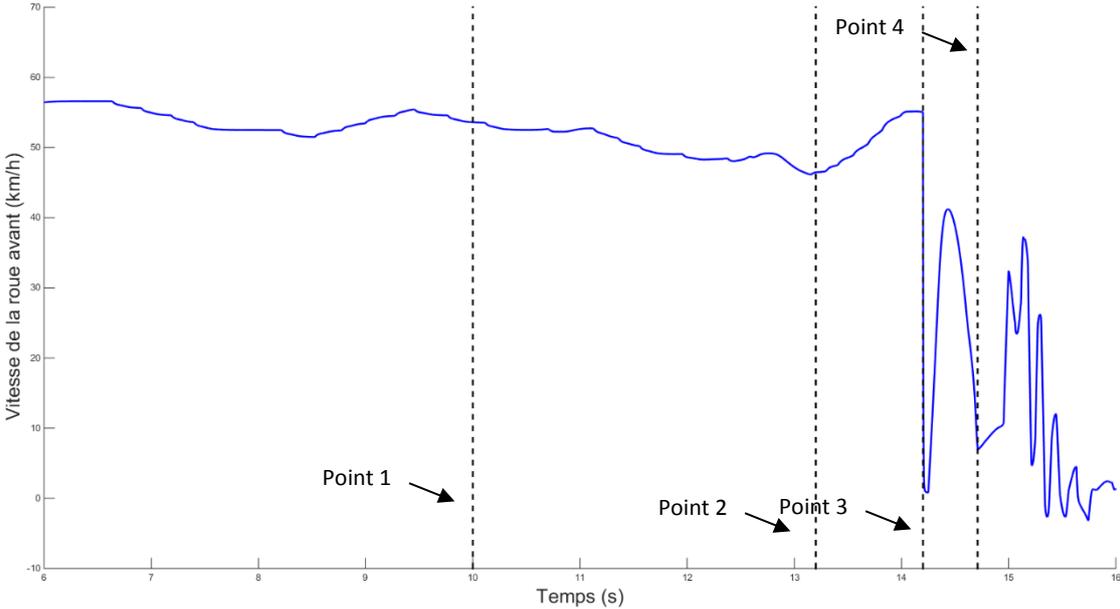


(b)

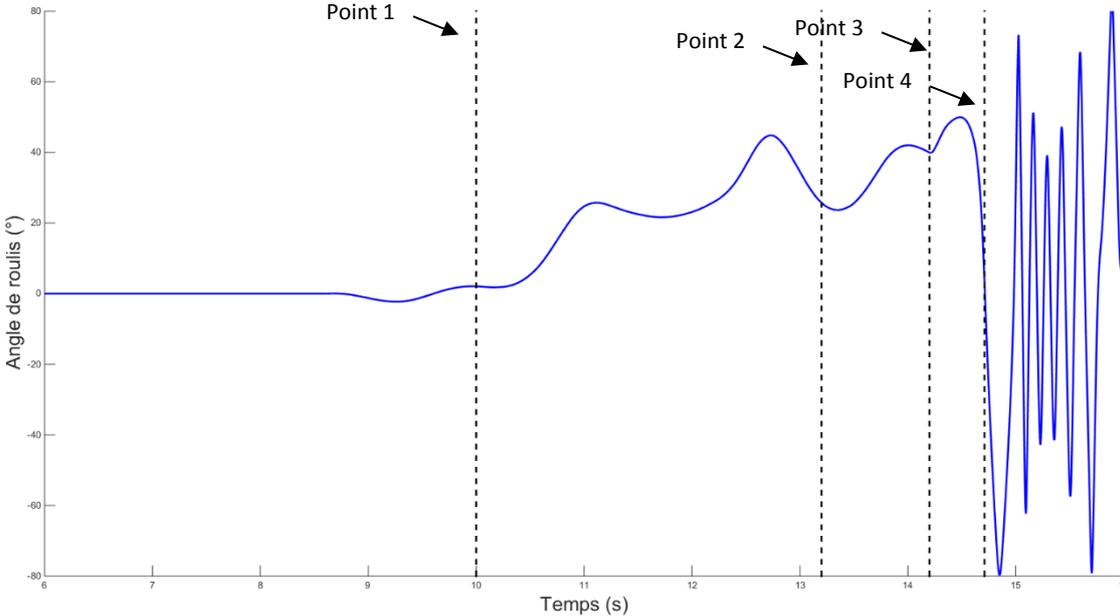
Figure 89 Entrées de vitesse (a) et de couple (b) originales et modulées

Comme on peut le voir sur la Figure 89, entre les points 1 et 4 la vitesse de consigne varie entre 43 km/h et 51 km/h. Le couple, quant à lui, varie entre -11.2 et -1 N.m. Le couple et la

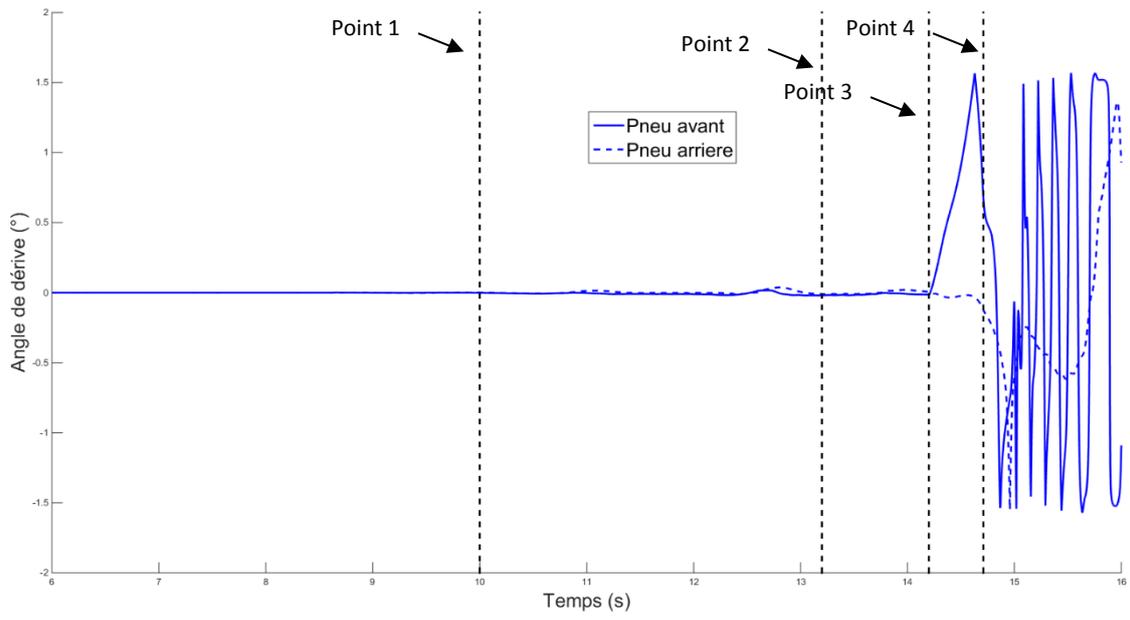
vitesse sont des entrées du modèle, si nous nous intéressons maintenant aux sorties, nous pouvons d'abord observer sur la Figure 90 (a) que la vitesse de la roue avant varie entre 7 km/h et 53 km/h, on observe clairement le blocage de roue induit par le freinage intensif à partir du 3^{ème} point. L'angle de roulis (Figure 90 (b)) varie entre -2 et 50°. Concernant l'angle de dérive (Figure 90 (c)), avant le freinage il ne dépasse pas 0.1° puis il augmente pour atteindre 1.5° et chuter brutalement, c'est à ce moment-là que le modèle commence à chuter. Si l'on s'intéresse aux efforts des pneumatiques, on peut observer sur la Figure 90 (d) que la force longitudinale F_x est quasiment constante et proche de 0 excepté au moment où l'on applique le freinage, on peut observer un pic à -1555 N. La force latérale, F_y varie entre environ -1850 et 20N. On peut observer une légère différence entre le pneumatique avant et le pneumatique arrière. Cela peut être expliqué par la répartition des masses sur l'avant et l'arrière. En effet, si l'on observe l'effort vertical F_z , on se rend compte que sa valeur est quasiment constante et que l'effort sur le pneu arrière est plus importante (environ 1780N à l'arrière et 1580N à l'avant). Cela corrobore bien le fait que sur une moto routière la répartition des masses est plus importante sur l'arrière. De plus, en additionnant la charge sur le pneu avant et sur le pneu arrière on obtient le poids du véhicule. Concernant les moments induits par l'effet des pneumatiques, on peut observer sur la Figure 90 (e) que le moment autour de l'axe y (transversal) reste constant et quasi nul du fait que F_x est constant et quasi nul. Le moment de renversement M_x varie entre -240 N.m et 0 N.m pour la roue arrière et entre -160 N.m et 0 N.m pour la roue avant. Concernant le moment d'auto-alignement M_z , on peut observer un minimum de -53 N.m et un maximum de 0 N.m avec des valeurs similaires sur la roue avant et la roue arrière.



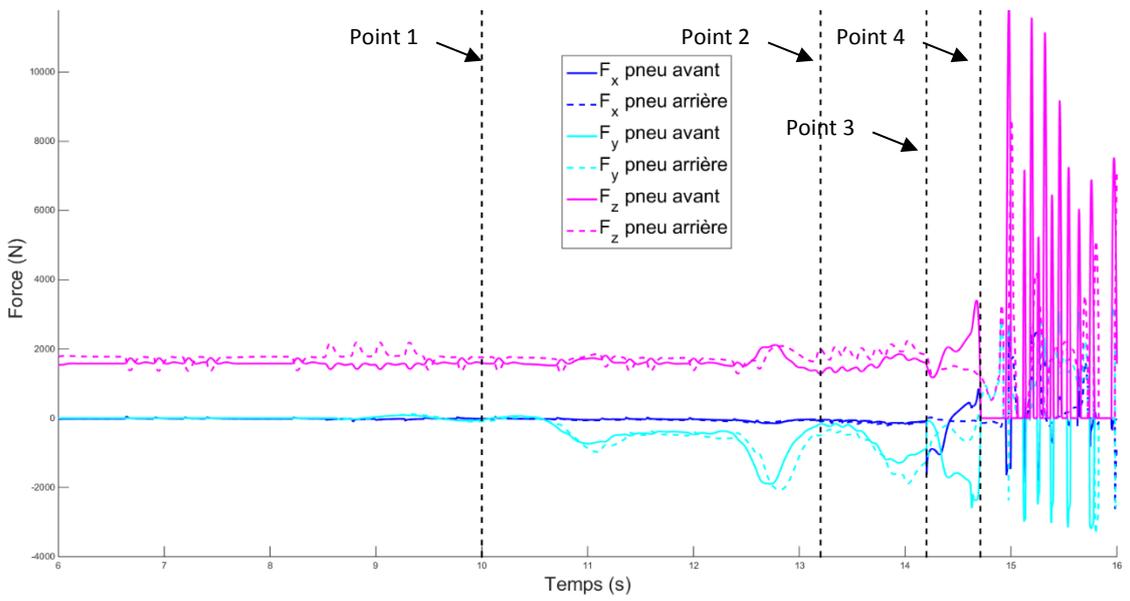
(a)



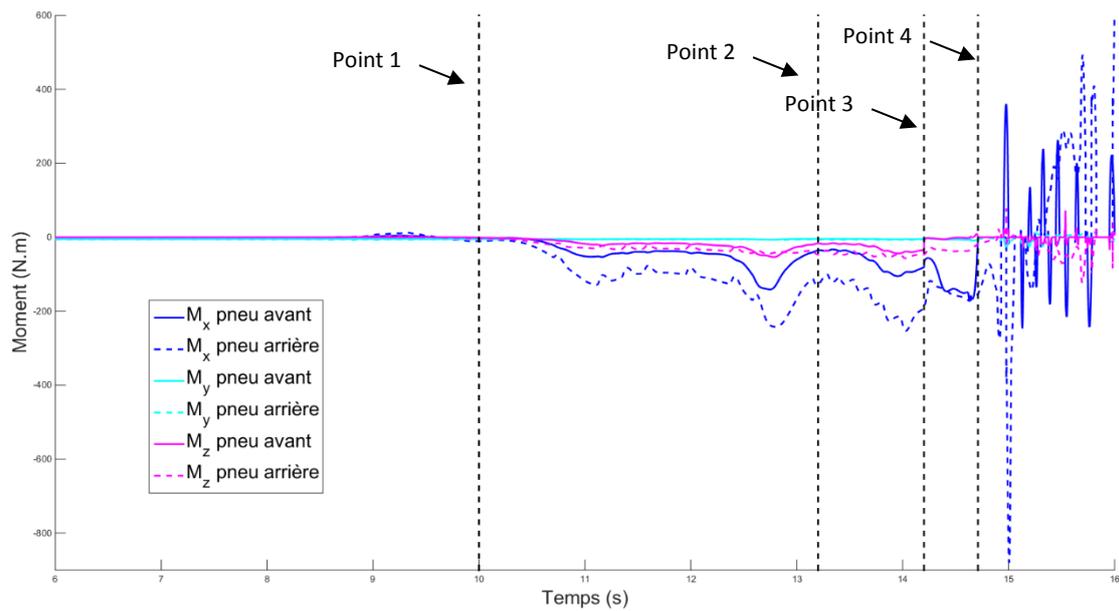
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure 90 Vitesse de la roue avant (a), angle de roulis (b), angle de dérive (c), forces (d) et moments (e) pneumatiques

8. Détection de la chute

Afin de pouvoir analyser les résultats de simulation, il est important de pouvoir détecter la chute du modèle numérique. Pour cela, nous avons observé l'ensemble des courbes tracées ci-dessus. Comme on peut le voir sur chacune d'entre elles, passé un certain point l'ensemble des valeurs devient incohérent ce qui traduit la chute du modèle numérique. Cependant nous cherchons à définir avec précision à quel instant les paramètres dynamiques divergent afin de programmer l'algorithme de détection de chute dans l'analyse numérique. Notre choix s'est finalement porté sur les forces pneumatiques. Un zoom de la Figure 90 (c) est présenté Figure 91. Peu de temps avant le point 4 l'angle de dérive atteint son maximum avant de diminuer brutalement, les signaux des forces sur les pneumatiques sont également perturbés à partir de ce moment là. En revanche, à partir du point 4 l'ensemble des forces pneumatique de la roue avant est égal à zéro, nous considérons alors que le modèle numérique a chuté.

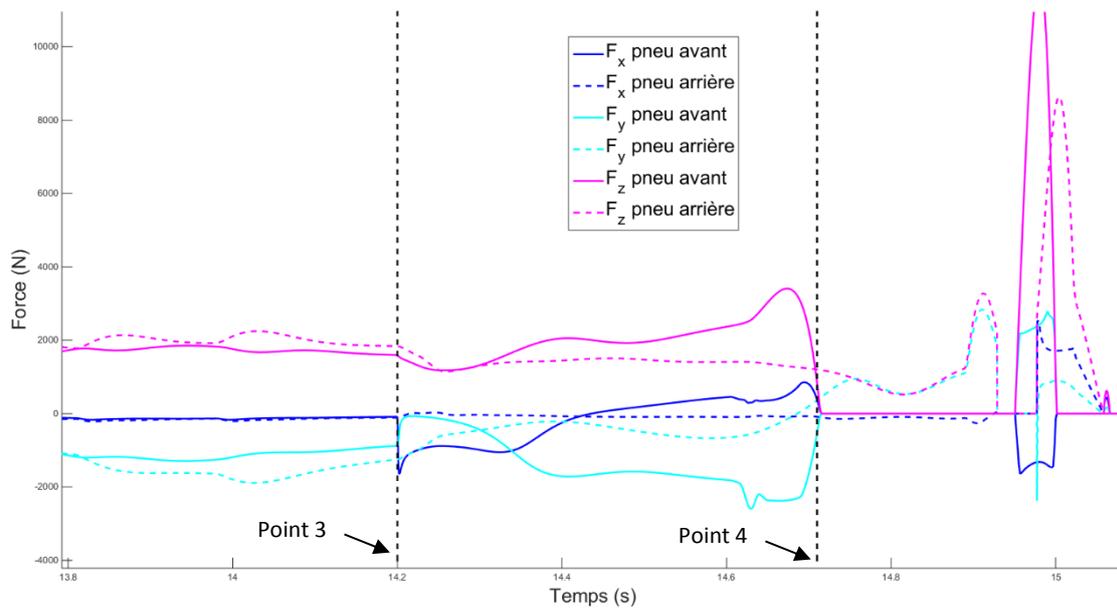


Figure 91 Efforts pneumatique pour la détection de chute

Conclusion & perspectives

La population motocycliste est largement surreprésentée dans les accidents de la route. Plus d'un tiers des personnes tuées l'est sans l'implication d'une tierce personne. Le rôle du comportement dynamique propre à ce type de véhicule peut poser question quant à la genèse de ces accidents. C'est pour cela que nous nous sommes intéressés à la dynamique de ce type de véhicule qui est si particulière. Une meilleure connaissance de la dynamique d'un 2RM permet une reconstruction d'accident plus fidèle à la réalité et de pallier un manque de données dans le domaine de l'identification des mécanismes d'accident. Ces travaux de thèse ont permis de mettre en lumière des lacunes de connaissance sur la phase précédant le choc. Nous nous sommes donc intéressés uniquement à cette phase de l'accident. L'objectif de cette thèse est de répondre à trois grandes questions :

- Comment modéliser et valider le comportement dynamique d'un 2RM en prenant en compte les spécificités de la reconstruction d'accident ?
- Comment identifier une situation d'urgence ?
- Comment traiter la reconstruction de la phase de pré-choc d'un accident ?

Nous avons au cours de ces travaux répondu à ces questions par le biais de méthodes numérique ou expérimentale. Dans ce qui suit, nous allons reprendre chacune des questions et dresser un bilan des actions qui ont été menées afin d'y répondre.

Quant à la question de la modélisation d'un 2RM, nous avons fait le choix de ne pas utiliser un modèle existant mais d'en créer un. En effet, plusieurs modèles existent mais ils ont des degrés de finesse variés et aucun d'entre eux ne prend en compte à priori les spécificités de la reconstruction d'accident en phase de pré-choc. Ils ont été développés pour modéliser des situations de conduite normale (virage, changement de file, ...) ou la phase de choc. Ainsi, nous avons développé notre modèle afin qu'il réponde à nos besoins. Pour cela, différents paramètres ont été pris en compte notamment les caractéristiques techniques du véhicule. Certains organes ont plus d'importance que d'autres, les pneumatiques par exemple, jouent un rôle fondamental dans la stabilité du véhicule. Les effets des suspensions sont également très importants et ne sont pas à négliger. Nous avons ainsi développé un modèle multicorps constitué de 6 corps et 11 degrés de liberté prenant en compte un modèle de pneumatique de Pacejka dédié au 2RM et un modèle de suspension. Une fois le modèle opérationnel,

nous l'avons validé expérimentalement. Pour cela nous avons réalisé des essais où la dynamique du véhicule est fortement sollicitée (slaloms, évitements, freinages). Ces manœuvres ont été simulées en utilisant le couple et la vitesse acquis comme entrées du modèle afin de le valider aussi bien en sollicitations longitudinales que transversales et combinées. Ces essais ont été réalisés à l'aide d'une moto instrumentée au cours de la thèse. L'originalité de l'équipement de cette moto provient d'un couplemètre installé sur le guidon afin de mesurer l'effort appliqué par le conducteur. De plus, la réalisation de manœuvre d'urgence à l'aide de la moto instrumentée nous a permis de combler un manque de données bibliographiques quant au couple appliqué par le conducteur sur le guidon lors de la réalisation de telles manœuvres.

Qu'est-ce qu'une situation d'urgence d'un point de vue dynamique du véhicule? Nous avons répondu à cette question suite aux essais sur piste où ont été réalisées des manœuvres d'urgences. L'analyse des données, aussi bien en longitudinal qu'en transversal, a permis de définir quels paramètres propres à la dynamique du véhicule permettent de distinguer les situations d'urgence des sollicitations importantes. Dans un second temps, en étudiant ces paramètres nous avons défini à partir de quel seuil peut-on dire que les sollicitations dynamiques du véhicule sont suffisamment importantes pour qualifier la situation d'urgence. Nous avons établi que la situation peut être qualifiée d'urgence quand l'accélération longitudinale du véhicule dépasse -6 m/s^2 (freinage intensif), la vitesse de roulis atteint $80^\circ/\text{s}$ ou l'accélération de roulis est au-delà de $300^\circ/\text{s}^2$. En parallèle de la thèse, le projet DYMOA a été mené. Une flotte de 2RM a été instrumentée avec un Enregistreur de Données Routière afin d'enregistrer un grand nombre de situations potentiellement accidentogènes dont la détection repose sur les critères établis précédemment.

L'objectif principal de cette thèse est de mettre au point un outil permettant de traiter la phase de pré-choc de l'accident. Cette dernière est la plus compliquée mais aussi la plus méconnue. A ce jour, il n'existe pas d'outil permettant d'analyser en détail cette phase de l'accident qui contient pourtant la plupart des éléments explicatifs de la survenue d'un accident. Le plus souvent ce sont les mêmes méthodes cinématiques déployées pour traiter les cas d'accidents impliquant un 4RM qui sont utilisées. Ces dernières ne sont pas très précises et dans certains cas peu adaptées aux spécificités des 2RM, laissant les experts baser leur analyse plus sur l'expérience que sur des calculs mathématiques produisant des éléments objectifs. C'est pour cela qu'au cours de cette thèse, nous avons mis en place une méthodologie permettant une analyse détaillée de cette phase. Elle se base sur la simulation

numérique, à l'aide du modèle multicorps développé, de différentes configurations permettant de déterminer un champ de possibilités. Pour cela, les entrées du modèle sont modulées puis les résultats de simulation analysés afin de définir une plage de variation de la vitesse du véhicule au cours de la phase de pré-choc mais aussi des actions du conducteur sur le guidon et sur les freins. L'opérationnalité de la méthodologie a été prouvée au travers de la reconstruction de 2 cas réels d'accident de différentes natures, une perte de contrôle en courbe liée au dépassement des capacités dynamiques du système (conducteur-véhicule-infrastructure) et une perte de contrôle en courbe consécutive à la réalisation d'un freinage d'urgence.

A ce titre, ces travaux de thèse nous ont permis d'atteindre nos objectifs, cependant nous envisageons plusieurs possibilités d'évolution mais aussi d'application pour ce modèle. Ces perspectives seront regroupées en 3 catégories : à court terme (2 ans), à moyen terme (3-5 ans) et à long terme (+10 ans).

Dans les quelques années à venir nous envisageons de travailler sur le couplage du modèle de 2RM avec un modèle de conducteur. Cela permettrait une meilleure prise en compte des effets directs des mouvements du corps du conducteur sur la dynamique du véhicule. En effet, pour la plupart des manœuvres le conducteur conduit « uniquement » avec les bras et donc le guidon or nous avons constaté que lors de la réalisation d'évitement que le conducteur était obligé de déplacer son buste. Cette manœuvre est une des plus présente en accidentologie, c'est pourquoi l'implémentation d'un conducteur qui ne serait pas solidaire du châssis améliorerait la simulation de ce type de manœuvre. A cela il faudrait ajouter l'implémentation d'un modèle de freinage avec la prise en compte de l'ABS puisque de plus en plus de moto en sont équipées. Le couplage du modèle de 2RM avec un modèle de conducteur et de freinage permettrait une prise en compte globale des effets du conducteur aussi bien en termes de position sur la moto que de gestion des actions (mouvement du guidon, gestion de l'allure). La version actuelle du modèle ou celle prenant en compte les évolutions pourrait alors être appliqué sur de nouveaux cas afin de tester son adaptation sur un panel de cas d'accident différents. Tous les travaux menés sur la détection de situation d'urgence pourraient être mis à profit pour le déclenchement de système de sécurité (Airbag) et l'évaluation des aides à la conduite. Le modèle pourrait également être implémenté dans un simulateur de conduite et utilisé pour la formation des conducteurs face aux situations d'urgence.

A moyen terme il pourrait être envisagé de coupler le modèle permettant de traiter la phase de pré-choc avec un modèle de comportement lors du choc. Cela permettrait de rassembler deux outils et ainsi simuler tout le continuum spatio-temporel de l'accident avec l'ensemble des phases, pré-choc, choc, post-choc. Une base de données de véhicules pourrait être implémentée dans le modèle. Cela permettrait d'améliorer la prise en compte de la géométrie de la moto afin que le modèle s'adapte au mieux lors des reconstructions d'accidents. Nous pourrions également envisager de poursuivre les travaux faits sur les critères de détection de situations d'urgence afin de les rendre plus fiables et permettre le développement d'aide à la conduite. On pourrait envisager un système qui avertirait le conducteur en temps réel sur « l'état » de sa conduite, sur la marge de sécurité restante et qui le préviendrait du danger imminent s'il n'agit pas pour éviter la chute. Afin de rendre l'outil de reconstruction de la phase de pré-choc opérationnel et utilisable par un plus grand nombre, il faudrait envisager de s'affranchir de l'utilisation de la moto lourdement instrumentée pour acquérir les paramètres d'entrée du modèle. Cela pourrait se faire en combinant l'utilisation d'un EDR sur une moto quelconque avec l'utilisation d'abaques permettant de définir le couple appliqué par le conducteur sur le guidon par exemple.

Ces évolutions à court et moyen terme permettrait d'ici quelques années d'industrialiser l'outil avec un simple boîtier de type smartphone pour se passer d'une moto lourdement instrumentée pour qu'il puisse être utilisé lors d'expertises. Une des applications de ces travaux pourrait être également dans le domaine des systèmes de type E-Call. Ce système pourrait permettre d'appeler les secours en cas d'accident mais aussi de donner des informations sur le type d'accident et donc sur les lésions possibles des personnes impliquées. Un boîtier enregistrant des données propres à la dynamique du véhicule est installé sur la moto et transmet ce qu'il a acquis afin qu'une simulation complète de l'accident soit faite pour établir les lésions subit par le conducteur.

Pour conclure, les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse ont permis de mettre au point un outil mais aussi une méthodologie permettant de reconstituer le déroulement de la phase de pré-choc d'un accident impliquant une moto. De plus, des investigations ont été menées quant à la détection d'une situation d'urgence à partir de mesures caractéristiques de la dynamique d'un deux-roues motorisé. Ces travaux ne sont qu'un début mais ils ont déjà permis d'obtenir des résultats satisfaisants et qui ouvrent un large champ de possibilités pour des études à venir.

Annexe 1

F_z : force normale (N)

F_{z0} : force normale nominale (N)

α : angle de dérivation (rad)

β : dérivation

γ : angle de roulis (rad)

κ : glissement longitudinal

Calcul de la force longitudinale (sans dérivation)

$$F_{x0} = D_x \sin[C_x \arctan\{B_x \kappa - E_x(B_x \kappa - \arctan(B_x \kappa))\}]$$

$$C_x = p_{cx1}$$

$$D_x = \mu_x F_z$$

$$\mu_x = p_{Dx1} + p_{Dx2} df_z$$

$$E_x = (p_{Ex1} + p_{Ex2} df_z + p_{Ex3} \cdot df_z^2) \cdot (1 - p_{Ex4} \operatorname{sgn}(\kappa))$$

$$K_{x\kappa} = F_z(p_{Kx1} + p_{Kx2} df_z) \cdot \exp(p_{Kx3} df_z)$$

$$B_x = \frac{K_{x\kappa}}{C_x D_x}$$

$$df_z = \frac{F_z - F_{z0}}{F_{z0}}$$

	Pneu avant 120/70	Pneu arrière 180/55
p_{cx1}	1.6064	1.6064
p_{Dx1}	1.3806	1.3548
p_{Dx2}	-0.041429	-0.060295
p_{Ex1}	0.0263	0.0263
p_{Ex2}	0.27056	0.27056
p_{Ex3}	-0.076882	-0.076882
p_{Ex4}	1.1268	1.1268
p_{Kx1}	25.939	25.939
p_{Kx2}	-4.2327	-4.2327
p_{Kx3}	0.33686	0.33686

Calcul de la force longitudinale (avec dérive)

$$F_x = G_{x\alpha} F_{x0}$$

$$G_{x\alpha} = \cos [C_{x\alpha} \arctan(B_{x\alpha}\beta)]$$

$$B_{x\alpha} = r_{Bx1} \cos [\arctan(r_{Bx2}\kappa)]$$

$$C_{x\alpha} = r_{Cx1}$$

r_{Bx1}	13.476
r_{Bx2}	11.354
r_{Cx1}	1.1231

Calcul de la force latérale (sans dérive)

$$F_{y0} = D_y \sin [C_y \arctan\{B_y\beta - E_y(B_y\beta - \arctan(B_y\beta))\} \\ + C_y \arctan\{B_y\gamma - E_y(B_y\gamma - \arctan(B_y\gamma))\}]$$

$$C_y = p_{Cy1}$$

$$D_y = \mu_y F_z$$

$$\mu_y = p_{Dy1} \frac{\exp(p_{Dy2} df_z)}{(1 + p_{Dy3} \gamma^2)}$$

$$E_y = p_{Ey1} + p_{Ey2} \gamma^2 + p_{Ey4} \gamma \operatorname{sgn}(\beta)$$

$$K_{y\alpha 0} = p_{Ky1} F_{z0} \sin \left[p_{Ky2} \arctan \left\{ \frac{F_z}{((p_{Ky3} + p_{Ky4} \gamma^2) F_{z0})} \right\} \right]$$

$$K_{y\alpha} = \frac{K_{y\alpha 0}}{(1 + p_{Ky5} \gamma^2)}$$

	<i>Pneu avant</i> 120/70	<i>Pneu arrière</i> 180/55
p_{Cy1}	0.83266	0.9
p_{Dy1}	1.3	1.3
p_{Dy2}	0	0
p_{Dy3}	0	0
p_{Ey1}	-1.2556	-2.2227
p_{Ey2}	-3.2068	-1.669
p_{Ey4}	-3.9975	-4.288

$$B_y = \frac{K_{y\alpha}}{(C_y D_y)}$$

$$C_y = p_{Cy2}$$

$$K_{yy} = (p_{Ky6} + p_{Ky7} df_z) F_z$$

$$E_y = p_{Ey5}$$

$$B_y = \frac{K_{yy}}{(C_y D_y)}$$

Calcul de la force latérale (avec dérive)

$$F_y = G_{y\kappa} F_{y0}$$

$$G_{y\kappa} = \cos [C_{y\kappa} \arctan(B_{y\kappa} \kappa)]$$

$$B_{y\kappa} = r_{By1} \cos [\arctan\{r_{By2}(\beta - r_{By3})\}]$$

$$C_{y\kappa} = r_{Cy1}$$

r_{By1}	7.7856
r_{By2}	8.1697
r_{By3}	-0.05914
r_{Cy1}	1.0533

Calcul du moment d'alignement (sans dérive)

$$M_{z0} = M_{zt0} + M_{zr0}$$

$$M_{zt0} = -t_0 F_{y00}$$

$$t_0 = \frac{D_t \cos[C_t \arctan\{B_t \beta - E_t(B_t \beta - \arctan(B_y \beta))\}]}{\sqrt{1+\beta^2}}$$

$$M_{zr0} = D_r \cos[\arctan(B_r \alpha_r)]$$

$$F_{y00} = F_{y0, \gamma=0}$$

$$\alpha_r = \beta + S_{Hr}$$

$$S_{Hr} = (q_{Hz3} + q_{Hz4} df_z) \gamma$$

$$B_t = (q_{Bz1} + q_{Bz2} df_z) \cdot (1 + q_{Bz5} |\gamma| + q_{Bz6} \gamma^2)$$

$$C_t = q_{Cz1}$$

$$D_{t0} = F_z \left(\frac{R_0}{F_{z0}} \right) \cdot (q_{Dz1} + q_{Dz2} df_z)$$

$$D_t = D_{t0} (1 + q_{Dz3} |\gamma| + q_{Dz4} \gamma^2)$$

$$E_t = (q_{Ez1} + q_{Ez2} df_z + q_{Ez3} df_z^2) \cdot \left\{ 1 + q_{Ez5} \gamma \left(\frac{2}{\pi} \right) \arctan(B_t C_t \beta) \right\}$$

$$B_r = q_{Bz9} + q_{Bz10} B_y C_y$$

$$D_r = F_z R_0 \frac{\{(q_{Dz8} + q_{Dz9} df_z) \gamma + (q_{Dz10} + q_{Dz11} df_z) \gamma |\gamma|\}}{\sqrt{1 + \beta^2}}$$

	<i>Pneu avant 120/70</i>	<i>Pneu arrière 180/55</i>
q_{Hz3}	-0.0037886	-0.028448
q_{Hz4}	-0.01557	-0.0098618
q_{Bz1}	10.486	10.041
q_{Bz2}	-0.0011536	-1.61E-08
q_{Bz5}	-0.68973	-0.076784
q_{Bz6}	1.0411	0.73422
q_{Cz1}	1.0917	1.3153
q_{Dz1}	0.19796	0.26331
q_{Dz2}	0.065629	0.030987
q_{Dz3}	0.2199	-0.62013
q_{Dz4}	0.21866	0.98524
q_{Ez1}	-0.91586	-0.19924
q_{Ez2}	0.11625	-0.017638
q_{Ez3}	-0.0024085	0
q_{Ez5}	1.4387	3.6511
q_{Bz9}	27.445	16.39
q_{Bz10}	-1.0792	-0.35549
q_{Dz8}	0.3682	0.50453
q_{Dz9}	0.1218	0.36312
q_{Dz10}	0.25439	-0.19168
q_{Dz11}	-0.17873	-0.40709

Calcul du moment d'alignement (avec dérive)

$$M_z = M_{zt} + M_{zr}$$

$$M_{zt} = -t \cdot F_{y,\gamma=0}$$

$$t = D_t \cos[C_t \arctan\{B_t \lambda_t - E_t(B_t \lambda_t - \arctan(B_t \lambda_t))\} / \sqrt{1 + \beta^2}]$$

$$F_{y,\gamma=0} = G_{y\kappa} \cdot F_{y0,\gamma=0}$$

$$M_{zr} = D_r \cos [\arctan(B_r \lambda_r)]$$

$$\lambda_t = \sqrt{\beta^2 + \left(\frac{K_{x\kappa}}{K_{y\alpha 00}}\right)^2} \kappa^2 \cdot \text{sgn}(\beta)$$

$$\lambda_r = \sqrt{\alpha_r^2 + \left(\frac{K_{x\kappa}}{K_{y\alpha 00}}\right)^2} \kappa^2 \cdot \text{sgn}(\alpha_r)$$

Annexe 2

La méthode du pendule [35] permet d'obtenir la matrice de chacun des corps et possède l'avantage de ne pas nécessiter de beaucoup de matériel. Elle consiste à suspendre chaque corps par un point, de façon que l'axe de rotation soit colinéaire avec l'un des trois axes principaux comme le montre la Figure 92 avec un solide quelconque.

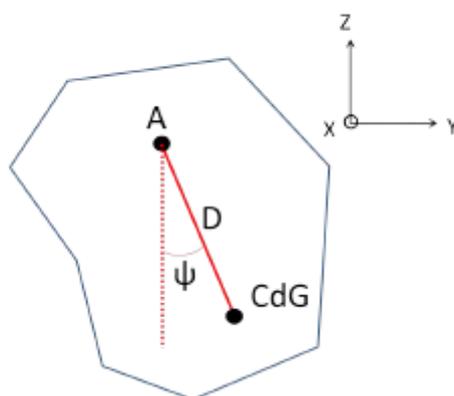


Figure 92 Détermination de l'inertie

Par la suite, on note ψ l'angle entre la verticale passant par le point de sustentation A et la direction définie par la droite (AG) et \vec{x} le vecteur normal au plan défini par ces 2 droites. En exploitant le théorème de Koenig, le moment cinétique en A du solide projeté sur l'axe \vec{x} noté $\sigma_{A,x}$ s'exprime alors comme :

$$\sigma_{A,x} = [I_A \omega_{SR} + m \overrightarrow{AG} \wedge \overrightarrow{V_A}] \cdot \vec{x} = I_{A,x} \dot{\psi} \quad (1)$$

avec I_A la matrice d'inertie en A du solide de masse m , ω_{SR} le vecteur vitesse de rotation du solide par rapport au repère fixe $\mathcal{R} = (x, y, z)$, $\overrightarrow{V_A}$ la vitesse du point A (avec ici $\overrightarrow{V_A} = 0$) et $I_{A,x}$ le moment d'inertie en A suivant l'axe X du solide. Ainsi, par application du théorème du moment dynamique on obtient :

$$\delta_{A,x} = I_{A,x} \ddot{\psi} = -mgD \sin(\psi) \quad (2)$$

avec $\delta_{A,x}$ le moment dynamique en A du solide suivant l'axe x et D la longueur du segment [AG].

Puis avec l'hypothèse des petites oscillations du solide autour de l'axe x ($\sin \psi \simeq \psi$), l'équation (2) devient :

$$\psi + \omega_0^2 \psi = 0 \quad (3)$$

où $\omega_0 = \sqrt{\frac{mgD}{I_{A,x}}}$, on en déduit que la période des oscillations T_0 est alors égale à :

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{I_{A,x}}{mgD}} \quad (4)$$

Finalement, en enregistrant les oscillations de la masse suspendue (en réalité, il s'agit de pseudo-oscillations à cause des frottements), il est possible d'estimer T_0 et d'en déduire le moment d'inertie du véhicule suivant l'axe x à partir de l'équation (4) et du théorème de Huygens :

$$I_{G,x} = I_{A,x} - m D^2 = \frac{mgDT_0^2}{4\pi^2} - mD^2 \quad (5)$$

Ainsi, la méthode du pendule pesant permet d'évaluer la valeur d'un moment d'inertie d'un solide en son centre de gravité suivant un axe. Par conséquent, en répétant cette procédure pour les trois axes principaux du véhicule, on obtient les trois moments d'inertie principaux au centre de gravité de chacun des corps.

Annexe 3

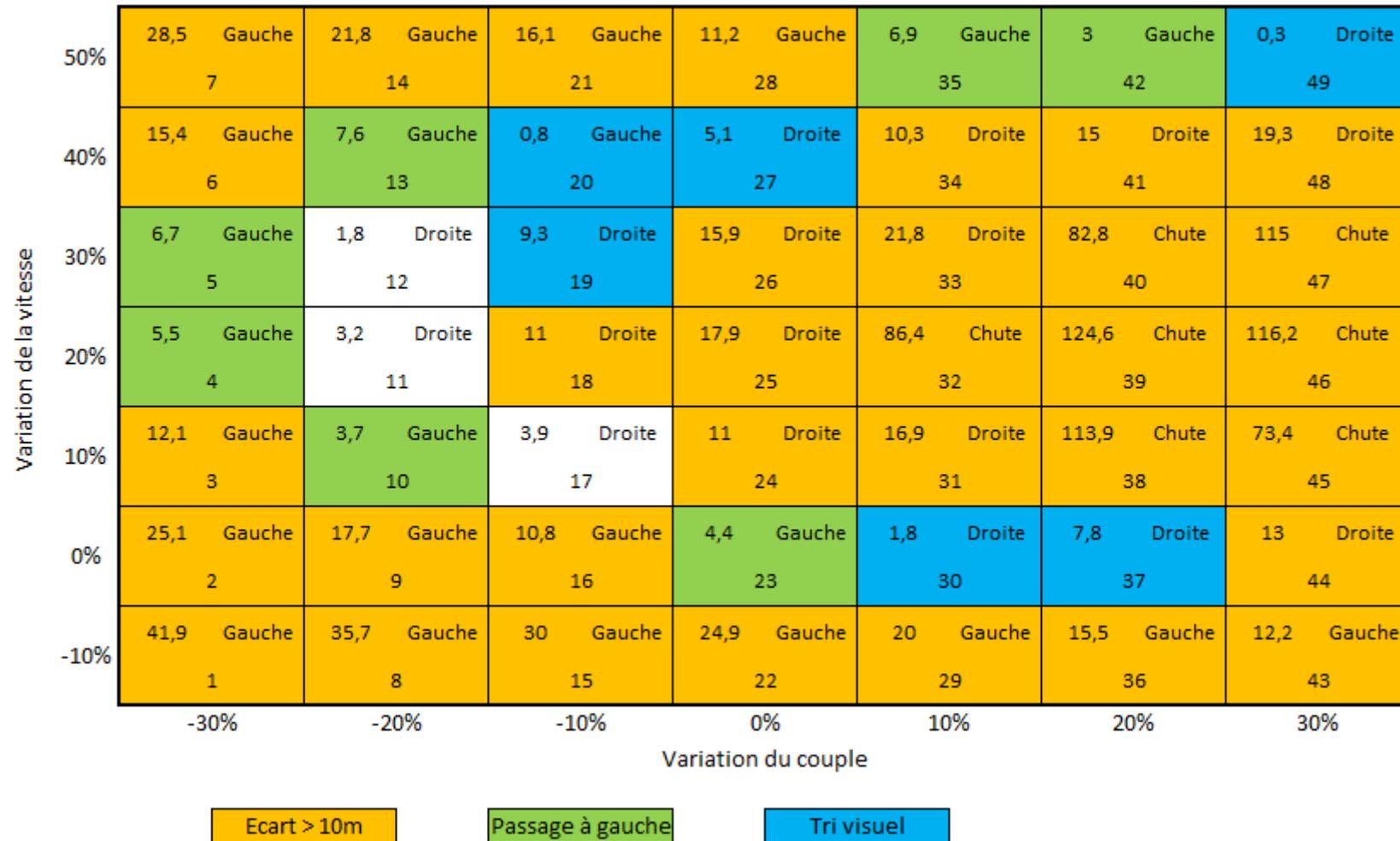


Figure 93 Matrice des résultats de la Configuration n°2 du cas d'accident n°1



Figure 94 Matrice des résultats de la Configuration n°3 du cas d'accident n°1

Annexe 4

Num	Ecart_choc	Vitesse_choc	Ecart_chute	Sens	Couple	Vitesse	Deb_frein	Durée_frein	Decel
1	1,75	37	-16,69	Chute	0,7	1	13	0,1	-8
2	2,49	41	/	Droite	0,7	1	13	0,1	-6
3	4,7	11	-17,84	Chute	0,7	1	13	0,3	-8
4	1,73	37	/	Droite	0,7	1	13	0,3	-6
5	4,63	6	-16,06	Chute	0,7	1	13	0,5	-8
6	0,73	33	/	Droite	0,7	1	13	0,5	-6
7	4,48	6	-14,34	Chute	0,7	1	13	0,7	-8
8	0,46	28	/	Gauche	0,7	1	13	0,7	-6
9	4,66	4	-14,17	Chute	0,7	1	13	0,9	-8
10	1,8	24	/	Gauche	0,7	1	13	0,9	-6
11	4,4	7	-12,66	Chute	0,7	1	13	1,1	-8
12	3,01	20	/	Gauche	0,7	1	13	1,1	-6
13	6,61	3	-10,36	Chute	0,7	1	13	1,3	-8
14	3,76	16	2,08	Chute	0,7	1	13	1,3	-6
15	2,16	39	-14,35	Chute	0,7	1	13,2	0,1	-8
16	2,62	42	/	Droite	0,7	1	13,2	0,1	-6
17	3,09	19	-13,96	Chute	0,7	1	13,2	0,3	-8
18	2,01	37	/	Droite	0,7	1	13,2	0,3	-6
19	3,87	11	-15,06	Chute	0,7	1	13,2	0,5	-8
20	1,23	33	/	Droite	0,7	1	13,2	0,5	-6
21	3,38	5	-13,25	Chute	0,7	1	13,2	0,7	-8
22	0,38	29	/	Droite	0,7	1	13,2	0,7	-6
23	4,47	5	-13,68	Chute	0,7	1	13,2	0,9	-8
24	0,45	24	/	Gauche	0,7	1	13,2	0,9	-6
25	3,38	5	-12,48	Chute	0,7	1	13,2	1,1	-8
26	1,11	20	/	Gauche	0,7	1	13,2	1,1	-6
27	4,29	4	-10,4	Chute	0,7	1	13,2	1,3	-8
28	1,55	16	3,82	Chute	0,7	1	13,2	1,3	-6
29	2,3	39	-11,91	Chute	0,7	1	13,4	0,1	-8
30	2,77	42	/	Droite	0,7	1	13,4	0,1	-6
31	3,71	22	-11,34	Chute	0,7	1	13,4	0,3	-8
32	2,28	38	/	Droite	0,7	1	13,4	0,3	-6
33	4,14	19	-11,03	Chute	0,7	1	13,4	0,5	-8
34	1,77	33	/	Droite	0,7	1	13,4	0,5	-6
35	4,23	17	-10,78	Chute	0,7	1	13,4	0,7	-8
36	1,31	29	/	Droite	0,7	1	13,4	0,7	-6
37	3,66	5	-13,03	Chute	0,7	1	13,4	0,9	-8
38	0,97	25	/	Droite	0,7	1	13,4	0,9	-6
39	3,2	6	-12,29	Chute	0,7	1	13,4	1,1	-8

Annexe 4

40	0,75	21	/	Droite	0,7	1	13,4	1,1	-6
41	3,41	2	-10,45	Chute	0,7	1	13,4	1,3	-8
42	0,63	17	/	Droite	0,7	1	13,4	1,3	-6
43	2,46	34	-9,46	Chute	0,7	1	13,6	0,1	-8
44	2,92	43	/	Droite	0,7	1	13,6	0,1	-6
45	3,88	26	-8,16	Chute	0,7	1	13,6	0,3	-8
46	2,61	38	/	Droite	0,7	1	13,6	0,3	-6
47	3,9	23	-7,95	Chute	0,7	1	13,6	0,5	-8
48	2,38	34	/	Droite	0,7	1	13,6	0,5	-6
49	3,89	22	-7,89	Chute	0,7	1	13,6	0,7	-8
50	2,26	30	/	Droite	0,7	1	13,6	0,7	-6
51	3,89	20	-7,87	Chute	0,7	1	13,6	0,9	-8
52	2,21	26	/	Droite	0,7	1	13,6	0,9	-6
53	3,89	20	-7,87	Chute	0,7	1	13,6	1,1	-8
54	2,2	23	/	Droite	0,7	1	13,6	1,1	-6
55	3,89	20	-7,87	Chute	0,7	1	13,6	1,3	-8
56	2,2	23	/	Droite	0,7	1	13,6	1,3	-6
57	3,38	36	-5,94	Chute	0,7	1	13,8	0,1	-8
58	3,08	44	/	Droite	0,7	1	13,8	0,1	-6
59	3,56	31	-5,59	Chute	0,7	1	13,8	0,3	-8
60	2,96	39	/	Droite	0,7	1	13,8	0,3	-6
61	3,54	29	-5,61	Chute	0,7	1	13,8	0,5	-8
62	2,93	34	/	Droite	0,7	1	13,8	0,5	-6
63	3,54	29	-5,64	Chute	0,7	1	13,8	0,7	-8
64	2,92	32	/	Droite	0,7	1	13,8	0,7	-6
65	3,54	29	-5,64	Chute	0,7	1	13,8	0,9	-8
66	2,92	32	/	Droite	0,7	1	13,8	0,9	-6
67	3,54	29	-5,64	Chute	0,7	1	13,8	1,1	-8
68	2,92	32	/	Droite	0,7	1	13,8	1,1	-6
69	3,54	29	-5,64	Chute	0,7	1	13,8	1,3	-8
70	2,92	32	/	Droite	0,7	1	13,8	1,3	-6
71	3,29	41	-3,31	Chute	0,7	1	14	0,1	-8
72	3,2	44	/	Droite	0,7	1	14	0,1	-6
73	3,27	37	-3,28	Chute	0,7	1	14	0,3	-8
74	3,19	39	/	Droite	0,7	1	14	0,3	-6
75	3,27	37	-3,28	Chute	0,7	1	14	0,5	-8
76	3,19	39	/	Droite	0,7	1	14	0,5	-6
77	3,27	37	-3,28	Chute	0,7	1	14	0,7	-8
78	3,19	39	/	Droite	0,7	1	14	0,7	-6
79	3,27	37	-3,28	Chute	0,7	1	14	0,9	-8
80	3,19	39	/	Droite	0,7	1	14	0,9	-6
81	3,27	37	-3,28	Chute	0,7	1	14	1,1	-8
82	3,19	39	/	Droite	0,7	1	14	1,1	-6

Annexe 4

83	3,27	37	-3,28	Chute	0,7	1	14	1,3	-8
84	3,19	39	/	Droite	0,7	1	14	1,3	-6
85	3,24	48	-0,55	Chute	0,7	1	14,2	0,1	-8
86	3,23	48	/	Droite	0,7	1	14,2	0,1	-6
87	3,24	48	-0,55	Chute	0,7	1	14,2	0,3	-8
88	3,23	48	/	Droite	0,7	1	14,2	0,3	-6
89	3,24	48	-0,55	Chute	0,7	1	14,2	0,5	-8
90	3,23	48	/	Droite	0,7	1	14,2	0,5	-6
91	3,24	48	-0,55	Chute	0,7	1	14,2	0,7	-8
92	3,23	48	/	Droite	0,7	1	14,2	0,7	-6
93	3,24	48	-0,55	Chute	0,7	1	14,2	0,9	-8
94	3,23	48	/	Droite	0,7	1	14,2	0,9	-6
95	3,24	48	-0,55	Chute	0,7	1	14,2	1,1	-8
96	3,23	48	/	Droite	0,7	1	14,2	1,1	-6
97	3,24	48	-0,55	Chute	0,7	1	14,2	1,3	-8
98	3,23	48	/	Droite	0,7	1	14,2	1,3	-6
99	3,23	51	2,29	Chute	0,7	1	14,4	0,1	-8
100	3,23	51	/	Droite	0,7	1	14,4	0,1	-6
101	3,23	51	2,29	Chute	0,7	1	14,4	0,3	-8
102	3,23	51	/	Droite	0,7	1	14,4	0,3	-6
103	3,23	51	2,29	Chute	0,7	1	14,4	0,5	-8
104	3,23	51	/	Droite	0,7	1	14,4	0,5	-6
105	3,23	51	2,29	Chute	0,7	1	14,4	0,7	-8
106	3,23	51	/	Droite	0,7	1	14,4	0,7	-6
107	3,23	51	2,29	Chute	0,7	1	14,4	0,9	-8
108	3,23	51	/	Droite	0,7	1	14,4	0,9	-6
109	3,23	51	2,29	Chute	0,7	1	14,4	1,1	-8
110	3,23	51	/	Droite	0,7	1	14,4	1,1	-6
111	3,23	51	2,29	Chute	0,7	1	14,4	1,3	-8
112	3,23	51	/	Droite	0,7	1	14,4	1,3	-6
113	0,65	38	-16,2	Chute	0,8	1	13	0,1	-8
114	1,29	41	/	Droite	0,8	1	13	0,1	-6
115	3,13	16	-16,61	Chute	0,8	1	13	0,3	-8
116	0,51	37	/	Droite	0,8	1	13	0,3	-6
117	2,67	5	-15,51	Chute	0,8	1	13	0,5	-8
118	0,5	33	/	Gauche	0,8	1	13	0,5	-6
119	2,59	10	-15,05	Chute	0,8	1	13	0,7	-8
120	1,65	28	/	Gauche	0,8	1	13	0,7	-6
121	3,44	8	-14,69	Chute	0,8	1	13	0,9	-8
122	2,81	24	3,77	Chute	0,8	1	13	0,9	-6
123	4,48	2	-12,14	Chute	0,8	1	13	1,1	-8
124	3,62	20	1,48	Chute	0,8	1	13	1,1	-6
125	5,87	2	-10,77	Chute	0,8	1	13	1,3	-8

126	3,99	17	0,68	Chute	0,8	1	13	1,3	-6
127	0,95	39	-13,86	Chute	0,8	1	13,2	0,1	-8
128	1,42	41	/	Droite	0,8	1	13,2	0,1	-6
129	1,64	20	-13,93	Chute	0,8	1	13,2	0,3	-8
130	0,78	37	/	Droite	0,8	1	13,2	0,3	-6
131	3,06	13	-13,29	Chute	0,8	1	13,2	0,5	-8
132	0,01	33	/	Gauche	0,8	1	13,2	0,5	-6
133	2,25	6	-13,43	Chute	0,8	1	13,2	0,7	-8
134	0,81	29	/	Gauche	0,8	1	13,2	0,7	-6
135	2,11	6	-13,47	Chute	0,8	1	13,2	0,9	-8
136	1,46	24	5,38	Chute	0,8	1	13,2	0,9	-6
137	1,67	7	-12,86	Chute	0,8	1	13,2	1,1	-8
138	1,85	21	3,24	Chute	0,8	1	13,2	1,1	-6
139	3,8	2	-10,58	Chute	0,8	1	13,2	1,3	-8
140	2,04	17	1,94	Chute	0,8	1	13,2	1,3	-6
141	1,05	39	-11,4	Chute	0,8	1	13,4	0,1	-8
142	1,57	42	/	Droite	0,8	1	13,4	0,1	-6
143	2,64	21	-11,43	Chute	0,8	1	13,4	0,3	-8
144	1,06	38	/	Droite	0,8	1	13,4	0,3	-6
145	3,08	20	-10,83	Chute	0,8	1	13,4	0,5	-8
146	0,55	33	/	Droite	0,8	1	13,4	0,5	-6
147	3,08	18	-10,9	Chute	0,8	1	13,4	0,7	-8
148	0,17	29	/	Droite	0,8	1	13,4	0,7	-6
149	2,78	9	-11,4	Chute	0,8	1	13,4	0,9	-8
150	0,06	25	/	Gauche	0,8	1	13,4	0,9	-6
151	2,68	9	-11,28	Chute	0,8	1	13,4	1,1	-8
152	0,16	21	5,43	Chute	0,8	1	13,4	1,1	-6
153	2,77	-1	-10,63	Chute	0,8	1	13,4	1,3	-8
154	0,19	17	3,68	Chute	0,8	1	13,4	1,3	-6
155	2,19	33	-8,46	Chute	0,8	1	13,6	0,1	-8
156	1,74	43	/	Droite	0,8	1	13,6	0,1	-6
157	2,83	26	-8,12	Chute	0,8	1	13,6	0,3	-8
158	1,41	38	/	Droite	0,8	1	13,6	0,3	-6
159	2,84	23	-7,94	Chute	0,8	1	13,6	0,5	-8
160	1,21	34	/	Droite	0,8	1	13,6	0,5	-6
161	2,83	21	-7,86	Chute	0,8	1	13,6	0,7	-8
162	1,13	30	/	Droite	0,8	1	13,6	0,7	-6
163	2,82	19	-7,98	Chute	0,8	1	13,6	0,9	-8
164	1,1	26	/	Droite	0,8	1	13,6	0,9	-6
165	2,82	19	-7,98	Chute	0,8	1	13,6	1,1	-8
166	1,1	26	/	Droite	0,8	1	13,6	1,1	-6
167	2,82	19	-7,98	Chute	0,8	1	13,6	1,3	-8
168	1,1	26	/	Droite	0,8	1	13,6	1,3	-6

Annexe 4

169	2,33	36	-5,7	Chute	0,8	1	13,8	0,1	-8
170	1,91	44	/	Droite	0,8	1	13,8	0,1	-6
171	2,45	31	-5,52	Chute	0,8	1	13,8	0,3	-8
172	1,8	39	/	Droite	0,8	1	13,8	0,3	-6
173	2,43	30	-5,56	Chute	0,8	1	13,8	0,5	-8
174	1,78	34	/	Droite	0,8	1	13,8	0,5	-6
175	2,43	30	-5,56	Chute	0,8	1	13,8	0,7	-8
176	1,77	33	/	Droite	0,8	1	13,8	0,7	-6
177	2,43	30	-5,56	Chute	0,8	1	13,8	0,9	-8
178	1,77	33	/	Droite	0,8	1	13,8	0,9	-6
179	2,43	30	-5,56	Chute	0,8	1	13,8	1,1	-8
180	1,77	33	/	Droite	0,8	1	13,8	1,1	-6
181	2,43	30	-5,56	Chute	0,8	1	13,8	1,3	-8
182	1,77	33	/	Droite	0,8	1	13,8	1,3	-6
183	2,14	42	-3,11	Chute	0,8	1	14	0,1	-8
184	2,04	44	/	Droite	0,8	1	14	0,1	-6
185	2,12	38	-3,11	Chute	0,8	1	14	0,3	-8
186	2,03	40	/	Droite	0,8	1	14	0,3	-6
187	2,12	38	-3,11	Chute	0,8	1	14	0,5	-8
188	2,03	40	/	Droite	0,8	1	14	0,5	-6
189	2,12	38	-3,11	Chute	0,8	1	14	0,7	-8
190	2,03	40	/	Droite	0,8	1	14	0,7	-6
191	2,12	38	-3,11	Chute	0,8	1	14	0,9	-8
192	2,03	40	/	Droite	0,8	1	14	0,9	-6
193	2,12	38	-3,11	Chute	0,8	1	14	1,1	-8
194	2,03	40	/	Droite	0,8	1	14	1,1	-6
195	2,12	38	-3,11	Chute	0,8	1	14	1,3	-8
196	2,03	40	/	Droite	0,8	1	14	1,3	-6
197	2,08	49	-0,36	Chute	0,8	1	14,2	0,1	-8
198	2,07	49	/	Droite	0,8	1	14,2	0,1	-6
199	2,08	49	-0,36	Chute	0,8	1	14,2	0,3	-8
200	2,07	49	/	Droite	0,8	1	14,2	0,3	-6
201	2,08	49	-0,36	Chute	0,8	1	14,2	0,5	-8
202	2,07	49	/	Droite	0,8	1	14,2	0,5	-6
203	2,08	49	-0,36	Chute	0,8	1	14,2	0,7	-8
204	2,07	49	/	Droite	0,8	1	14,2	0,7	-6
205	2,08	49	-0,36	Chute	0,8	1	14,2	0,9	-8
206	2,07	49	/	Droite	0,8	1	14,2	0,9	-6
207	2,08	49	-0,36	Chute	0,8	1	14,2	1,1	-8
208	2,07	49	/	Droite	0,8	1	14,2	1,1	-6
209	2,08	49	-0,36	Chute	0,8	1	14,2	1,3	-8
210	2,07	49	/	Droite	0,8	1	14,2	1,3	-6
211	2,08	51	2,5	Chute	0,8	1	14,4	0,1	-8

Annexe 4

212	2,08	51	/	Droite	0,8	1	14,4	0,1	-6
213	2,08	51	2,5	Chute	0,8	1	14,4	0,3	-8
214	2,08	51	/	Droite	0,8	1	14,4	0,3	-6
215	2,08	51	2,5	Chute	0,8	1	14,4	0,5	-8
216	2,08	51	/	Droite	0,8	1	14,4	0,5	-6
217	2,08	51	2,5	Chute	0,8	1	14,4	0,7	-8
218	2,08	51	/	Droite	0,8	1	14,4	0,7	-6
219	2,08	51	2,5	Chute	0,8	1	14,4	0,9	-8
220	2,08	51	/	Droite	0,8	1	14,4	0,9	-6
221	2,08	51	2,5	Chute	0,8	1	14,4	1,1	-8
222	2,08	51	/	Droite	0,8	1	14,4	1,1	-6
223	2,08	51	2,5	Chute	0,8	1	14,4	1,3	-8
224	2,08	51	/	Droite	0,8	1	14,4	1,3	-6
225	0,31	38	-15,64	Chute	0,9	1	13	0,1	-8
226	0,25	41	/	Droite	0,9	1	13	0,1	-6
227	0,78	17	-16,1	Chute	0,9	1	13	0,3	-8
228	0,55	37	/	Gauche	0,9	1	13	0,3	-6
229	2,92	0	-15,05	Chute	0,9	1	13	0,5	-8
230	1,55	33	8,64	Chute	0,9	1	13	0,5	-6
231	1,8	5	-14,72	Chute	0,9	1	13	0,7	-8
232	2,62	28	4,26	Chute	0,9	1	13	0,7	-6
233	1,88	9	-14,46	Chute	0,9	1	13	0,9	-8
234	3,38	22	0,43	Chute	0,9	1	13	0,9	-6
235	2,9	3	-12,9	Chute	0,9	1	13	1,1	-8
236	3,39	8	-2,43	Chute	0,9	1	13	1,1	-6
237	5,04	3	-10,81	Chute	0,9	1	13	1,3	-8
238	3,38	6	-2,39	Chute	0,9	1	13	1,3	-6
239	0,12	39	-13,28	Chute	0,9	1	13,2	0,1	-8
240	0,37	41	/	Droite	0,9	1	13,2	0,1	-6
241	0,62	20	-13,52	Chute	0,9	1	13,2	0,3	-8
242	0,29	37	/	Gauche	0,9	1	13,2	0,3	-6
243	2,12	10	-13,27	Chute	0,9	1	13,2	0,5	-8
244	1,06	33	9,32	Chute	0,9	1	13,2	0,5	-6
245	2,47	11	-13,14	Chute	0,9	1	13,2	0,7	-8
246	1,77	28	5,14	Chute	0,9	1	13,2	0,7	-6
247	2,31	2	-12,88	Chute	0,9	1	13,2	0,9	-8
248	2,22	24	2,83	Chute	0,9	1	13,2	0,9	-6
249	2,15	0	-11,91	Chute	0,9	1	13,2	1,1	-8
250	2,43	21	1,78	Chute	0,9	1	13,2	1,1	-6
251	3,07	-1	-10,7	Chute	0,9	1	13,2	1,3	-8
252	2,5	17	1,23	Chute	0,9	1	13,2	1,3	-6
253	0,06	39	-10,83	Chute	0,9	1	13,4	0,1	-8
254	0,52	42	/	Droite	0,9	1	13,4	0,1	-6

Annexe 4

255	1,67	22	-11,11	Chute	0,9	1	13,4	0,3	-8
256	0,01	37	/	Gauche	0,9	1	13,4	0,3	-6
257	2,16	21	-10,69	Chute	0,9	1	13,4	0,5	-8
258	0,48	33	10,71	Chute	0,9	1	13,4	0,5	-6
259	2,16	19	-10,7	Chute	0,9	1	13,4	0,7	-8
260	0,78	29	7,14	Chute	0,9	1	13,4	0,7	-6
261	1,81	14	-11,04	Chute	0,9	1	13,4	0,9	-8
262	0,91	25	5,01	Chute	0,9	1	13,4	0,9	-6
263	1,57	5	-11,29	Chute	0,9	1	13,4	1,1	-8
264	0,94	21	3,65	Chute	0,9	1	13,4	1,1	-6
265	1,84	-1	-10,35	Chute	0,9	1	13,4	1,3	-8
266	0,94	20	2,78	Chute	0,9	1	13,4	1,3	-6
267	1,5	32	-8,22	Chute	0,9	1	13,6	0,1	-8
268	0,7	43	/	Droite	0,9	1	13,6	0,1	-6
269	1,92	26	-8,05	Chute	0,9	1	13,6	0,3	-8
270	0,38	38	/	Droite	0,9	1	13,6	0,3	-6
271	1,92	24	-7,93	Chute	0,9	1	13,6	0,5	-8
272	0,21	34	/	Droite	0,9	1	13,6	0,5	-6
273	1,91	21	-7,88	Chute	0,9	1	13,6	0,7	-8
274	0,16	30	/	Droite	0,9	1	13,6	0,7	-6
275	1,88	19	-8,14	Chute	0,9	1	13,6	0,9	-8
276	0,16	28	7,68	Chute	0,9	1	13,6	0,9	-6
277	1,88	19	-8,14	Chute	0,9	1	13,6	1,1	-8
278	0,16	28	6,13	Chute	0,9	1	13,6	1,1	-6
279	1,88	19	-8,14	Chute	0,9	1	13,6	1,3	-8
280	0,16	28	5,18	Chute	0,9	1	13,6	1,3	-6
281	1,39	36	-5,48	Chute	0,9	1	13,8	0,1	-8
282	0,89	43	/	Droite	0,9	1	13,8	0,1	-6
283	1,46	32	-5,42	Chute	0,9	1	13,8	0,3	-8
284	0,8	39	/	Droite	0,9	1	13,8	0,3	-6
285	1,44	30	-5,48	Chute	0,9	1	13,8	0,5	-8
286	0,78	35	/	Droite	0,9	1	13,8	0,5	-6
287	1,44	30	-5,48	Chute	0,9	1	13,8	0,7	-8
288	0,78	34	/	Droite	0,9	1	13,8	0,7	-6
289	1,44	30	-5,48	Chute	0,9	1	13,8	0,9	-8
290	0,78	34	/	Droite	0,9	1	13,8	0,9	-6
291	1,44	30	-5,48	Chute	0,9	1	13,8	1,1	-8
292	0,78	34	/	Droite	0,9	1	13,8	1,1	-6
293	1,44	30	-5,48	Chute	0,9	1	13,8	1,3	-8
294	0,78	34	8,13	Chute	0,9	1	13,8	1,3	-6
295	1,12	42	-2,86	Chute	0,9	1	14	0,1	-8
296	1,03	44	/	Droite	0,9	1	14	0,1	-6
297	1,11	38	-2,89	Chute	0,9	1	14	0,3	-8

Annexe 4

298	1,02	41	/	Droite	0,9	1	14	0,3	-6
299	1,11	38	-2,89	Chute	0,9	1	14	0,5	-8
300	1,02	41	/	Droite	0,9	1	14	0,5	-6
301	1,11	38	-2,89	Chute	0,9	1	14	0,7	-8
302	1,02	41	/	Droite	0,9	1	14	0,7	-6
303	1,11	38	-2,89	Chute	0,9	1	14	0,9	-8
304	1,02	41	/	Droite	0,9	1	14	0,9	-6
305	1,11	38	-2,89	Chute	0,9	1	14	1,1	-8
306	1,02	41	/	Droite	0,9	1	14	1,1	-6
307	1,11	38	-2,89	Chute	0,9	1	14	1,3	-8
308	1,02	41	/	Droite	0,9	1	14	1,3	-6
309	1,06	50	-0,08	Chute	0,9	1	14,2	0,1	-8
310	1,06	50	/	Droite	0,9	1	14,2	0,1	-6
311	1,06	50	-0,08	Chute	0,9	1	14,2	0,3	-8
312	1,06	50	/	Droite	0,9	1	14,2	0,3	-6
313	1,06	50	-0,08	Chute	0,9	1	14,2	0,5	-8
314	1,06	50	/	Droite	0,9	1	14,2	0,5	-6
315	1,06	50	-0,08	Chute	0,9	1	14,2	0,7	-8
316	1,06	50	/	Droite	0,9	1	14,2	0,7	-6
317	1,06	50	-0,08	Chute	0,9	1	14,2	0,9	-8
318	1,06	50	/	Droite	0,9	1	14,2	0,9	-6
319	1,06	50	-0,08	Chute	0,9	1	14,2	1,1	-8
320	1,06	50	/	Droite	0,9	1	14,2	1,1	-6
321	1,06	50	-0,08	Chute	0,9	1	14,2	1,3	-8
322	1,06	50	/	Droite	0,9	1	14,2	1,3	-6
323	1,06	51	2,76	Chute	0,9	1	14,4	0,1	-8
324	1,06	51	/	Droite	0,9	1	14,4	0,1	-6
325	1,06	51	2,76	Chute	0,9	1	14,4	0,3	-8
326	1,06	51	/	Droite	0,9	1	14,4	0,3	-6
327	1,06	51	2,76	Chute	0,9	1	14,4	0,5	-8
328	1,06	51	/	Droite	0,9	1	14,4	0,5	-6
329	1,06	51	2,76	Chute	0,9	1	14,4	0,7	-8
330	1,06	51	/	Droite	0,9	1	14,4	0,7	-6
331	1,06	51	2,76	Chute	0,9	1	14,4	0,9	-8
332	1,06	51	/	Droite	0,9	1	14,4	0,9	-6
333	1,06	51	2,76	Chute	0,9	1	14,4	1,1	-8
334	1,06	51	/	Droite	0,9	1	14,4	1,1	-6
335	1,06	51	2,76	Chute	0,9	1	14,4	1,3	-8
336	1,06	51	/	Droite	0,9	1	14,4	1,3	-6
337	1,17	38	-15,07	Chute	1	1	13	0,1	-8
338	0,67	41	/	Gauche	1	1	13	0,1	-6
339	1,02	17	-15,13	Chute	1	1	13	0,3	-8

Annexe 4

340	1,47	37	9,98	Chute	1	1	13	0,3	-6
341	0,24	10	-15,76	Chute	1	1	13	0,5	-8
342	2,45	32	5,36	Chute	1	1	13	0,5	-6
343	2,56	3	-14,49	Chute	1	1	13	0,7	-8
344	3,17	26	0,42	Chute	1	1	13	0,7	-6
345	3,48	-3	-12,7	Chute	1	1	13	0,9	-8
346	2,93	14	-2,3	Chute	1	1	13	0,9	-6
347	3,72	-3	-12,1	Chute	1	1	13	1,1	-8
348	3,1	10	-2,23	Chute	1	1	13	1,1	-6
349	4,89	-2	-10,85	Chute	1	1	13	1,3	-8
350	3,3	8	-1,89	Chute	1	1	13	1,3	-6
351	1,07	39	-12,7	Chute	1	1	13,2	0,1	-8
352	0,56	41	/	Gauche	1	1	13,2	0,1	-6
353	0,15	19	-13,07	Chute	1	1	13,2	0,3	-8
354	1,23	37	10,42	Chute	1	1	13,2	0,3	-6
355	0,85	3	-13,06	Chute	1	1	13,2	0,5	-8
356	1,96	33	5,54	Chute	1	1	13,2	0,5	-6
357	1,68	-1	-13,03	Chute	1	1	13,2	0,7	-8
358	2,29	26	0,73	Chute	1	1	13,2	0,7	-6
359	1,89	-3	-12,31	Chute	1	1	13,2	0,9	-8
360	2,48	20	-0,42	Chute	1	1	13,2	0,9	-6
361	1,97	-1	-11,43	Chute	1	1	13,2	1,1	-8
362	2,54	15	-0,6	Chute	1	1	13,2	1,1	-6
363	2,97	2	-10,25	Chute	1	1	13,2	1,3	-8
364	2,55	11	-1,02	Chute	1	1	13,2	1,3	-6
365	0,7	33	-10,43	Chute	1	1	13,4	0,1	-8
366	0,41	42	/	Gauche	1	1	13,4	0,1	-6
367	0,9	23	-10,75	Chute	1	1	13,4	0,3	-8
368	0,93	37	11,02	Chute	1	1	13,4	0,3	-6
369	1,33	20	-10,66	Chute	1	1	13,4	0,5	-8
370	1,35	33	6,84	Chute	1	1	13,4	0,5	-6
371	1,34	19	-10,66	Chute	1	1	13,4	0,7	-8
372	1,56	29	4,62	Chute	1	1	13,4	0,7	-6
373	1,1	15	-10,74	Chute	1	1	13,4	0,9	-8
374	1,63	26	3,48	Chute	1	1	13,4	0,9	-6
375	0,7	7	-11,24	Chute	1	1	13,4	1,1	-8
376	1,64	23	2,67	Chute	1	1	13,4	1,1	-6
377	0,75	1	-10,38	Chute	1	1	13,4	1,3	-8
378	1,64	23	2,3	Chute	1	1	13,4	1,3	-6
379	0,81	32	-8	Chute	1	1	13,6	0,1	-8
380	0,21	43	/	Gauche	1	1	13,6	0,1	-6
381	1,13	26	-7,93	Chute	1	1	13,6	0,3	-8
382	0,51	38	12,78	Chute	1	1	13,6	0,3	-6

Annexe 4

383	1,12	24	-7,89	Chute	1	1	13,6	0,5	-8
384	0,64	34	9,21	Chute	1	1	13,6	0,5	-6
385	1,12	21	-7,87	Chute	1	1	13,6	0,7	-8
386	0,67	30	7,1	Chute	1	1	13,6	0,7	-6
387	1,12	20	-7,89	Chute	1	1	13,6	0,9	-8
388	0,67	29	5,78	Chute	1	1	13,6	0,9	-6
389	1,12	20	-7,89	Chute	1	1	13,6	1,1	-8
390	0,67	29	4,88	Chute	1	1	13,6	1,1	-6
391	1,12	20	-7,89	Chute	1	1	13,6	1,3	-8
392	0,67	29	4,52	Chute	1	1	13,6	1,3	-6
393	0,54	36	-5,31	Chute	1	1	13,8	0,1	-8
394	0,01	43	/	Gauche	1	1	13,8	0,1	-6
395	0,58	32	-5,3	Chute	1	1	13,8	0,3	-8
396	0,08	39	/	Gauche	1	1	13,8	0,3	-6
397	0,57	31	-5,3	Chute	1	1	13,8	0,5	-8
398	0,09	35	12,1	Chute	1	1	13,8	0,5	-6
399	0,57	31	-5,3	Chute	1	1	13,8	0,7	-8
400	0,09	35	9,89	Chute	1	1	13,8	0,7	-6
401	0,57	31	-5,3	Chute	1	1	13,8	0,9	-8
402	0,09	35	8,39	Chute	1	1	13,8	0,9	-6
403	0,57	31	-5,3	Chute	1	1	13,8	1,1	-8
404	0,09	35	7,54	Chute	1	1	13,8	1,1	-6
405	0,57	31	-5,3	Chute	1	1	13,8	1,3	-8
406	0,09	35	7,06	Chute	1	1	13,8	1,3	-6
407	0,21	42	-2,59	Chute	1	1	14	0,1	-8
408	0,13	44	/	Droite	1	1	14	0,1	-6
409	0,2	39	-2,6	Chute	1	1	14	0,3	-8
410	0,13	41	/	Droite	1	1	14	0,3	-6
411	0,2	39	-2,6	Chute	1	1	14	0,5	-8
412	0,13	41	/	Droite	1	1	14	0,5	-6
413	0,2	39	-2,6	Chute	1	1	14	0,7	-8
414	0,13	41	/	Droite	1	1	14	0,7	-6
415	0,2	39	-2,6	Chute	1	1	14	0,9	-8
416	0,13	41	11,37	Chute	1	1	14	0,9	-6
417	0,2	39	-2,6	Chute	1	1	14	1,1	-8
418	0,13	41	10,43	Chute	1	1	14	1,1	-6
419	0,2	39	-2,6	Chute	1	1	14	1,3	-8
420	0,13	41	9,88	Chute	1	1	14	1,3	-6
421	0,15	51	0,25	Chute	1	1	14,2	0,1	-8
422	0,15	51	/	Droite	1	1	14,2	0,1	-6
423	0,15	51	0,25	Chute	1	1	14,2	0,3	-8
424	0,15	51	/	Droite	1	1	14,2	0,3	-6

Annexe 4

425	0,15	51	0,25	Chute	1	1	14,2	0,5	-8
426	0,15	51	/	Droite	1	1	14,2	0,5	-6
427	0,15	51	0,25	Chute	1	1	14,2	0,7	-8
428	0,15	51	/	Droite	1	1	14,2	0,7	-6
429	0,15	51	0,25	Chute	1	1	14,2	0,9	-8
430	0,15	51	/	Droite	1	1	14,2	0,9	-6
431	0,15	51	0,25	Chute	1	1	14,2	1,1	-8
432	0,15	51	/	Droite	1	1	14,2	1,1	-6
433	0,15	51	0,25	Chute	1	1	14,2	1,3	-8
434	0,15	51	12,9	Chute	1	1	14,2	1,3	-6
435	0,15	51	3,11	Chute	1	1	14,4	0,1	-8
436	0,15	51	/	Droite	1	1	14,4	0,1	-6
437	0,15	51	3,11	Chute	1	1	14,4	0,3	-8
438	0,15	51	/	Droite	1	1	14,4	0,3	-6
439	0,15	51	3,11	Chute	1	1	14,4	0,5	-8
440	0,15	51	/	Droite	1	1	14,4	0,5	-6
441	0,15	51	3,11	Chute	1	1	14,4	0,7	-8
442	0,15	51	/	Droite	1	1	14,4	0,7	-6
443	0,15	51	3,11	Chute	1	1	14,4	0,9	-8
444	0,15	51	/	Droite	1	1	14,4	0,9	-6
445	0,15	51	3,11	Chute	1	1	14,4	1,1	-8
446	0,15	51	/	Droite	1	1	14,4	1,1	-6
447	0,15	51	3,11	Chute	1	1	14,4	1,3	-8
448	0,15	51	/	Droite	1	1	14,4	1,3	-6
449	1,93	38	-14,53	Chute	1,1	1	13	0,1	-8
450	1,48	41	11,03	Chute	1,1	1	13	0,1	-6
451	2,02	19	-14,45	Chute	1,1	1	13	0,3	-8
452	2,28	37	6,7	Chute	1,1	1	13	0,3	-6
453	1,25	-3	-14,17	Chute	1,1	1	13	0,5	-8
454	3,11	31	1,92	Chute	1,1	1	13	0,5	-6
455	2,63	5	-12,82	Chute	1,1	1	13	0,7	-8
456	2,93	18	-2,56	Chute	1,1	1	13	0,7	-6
457	2,73	0	-12,92	Chute	1,1	1	13	0,9	-8
458	3,28	16	-2,61	Chute	1,1	1	13	0,9	-6
459	4,02	3	-11,41	Chute	1,1	1	13	1,1	-8
460	3,55	13	-2,74	Chute	1,1	1	13	1,1	-6
461	4,94	4	-10,48	Chute	1,1	1	13	1,3	-8
462	3,59	12	-2,7	Chute	1,1	1	13	1,3	-6
463	1,92	38	-12,11	Chute	1,1	1	13,2	0,1	-8
464	1,38	41	11,53	Chute	1,1	1	13,2	0,1	-6
465	0,54	20	-12,8	Chute	1,1	1	13,2	0,3	-8
466	2,04	37	6,8	Chute	1,1	1	13,2	0,3	-6

Annexe 4

467	0,37	4	-13,01	Chute	1,1	1	13,2	0,5	-8
468	2,39	29	0,61	Chute	1,1	1	13,2	0,5	-6
469	0,14	5	-13,09	Chute	1,1	1	13,2	0,7	-8
470	2,39	20	-1,58	Chute	1,1	1	13,2	0,7	-6
471	1,01	0	-12,09	Chute	1,1	1	13,2	0,9	-8
472	2,42	18	-1,94	Chute	1,1	1	13,2	0,9	-6
473	1,84	2	-11,12	Chute	1,1	1	13,2	1,1	-8
474	2,45	16	-1,94	Chute	1,1	1	13,2	1,1	-6
475	2,77	2	-10,19	Chute	1,1	1	13,2	1,3	-8
476	2,45	15	-1,94	Chute	1,1	1	13,2	1,3	-6
477	1,05	32	-10,25	Chute	1,1	1	13,4	0,1	-8
478	1,22	42	12,34	Chute	1,1	1	13,4	0,1	-6
479	0,28	23	-10,48	Chute	1,1	1	13,4	0,3	-8
480	1,71	37	6,99	Chute	1,1	1	13,4	0,3	-6
481	0,66	20	-10,48	Chute	1,1	1	13,4	0,5	-8
482	1,92	31	2,03	Chute	1,1	1	13,4	0,5	-6
483	0,66	18	-10,46	Chute	1,1	1	13,4	0,7	-8
484	2	27	1,09	Chute	1,1	1	13,4	0,7	-6
485	0,43	14	-10,49	Chute	1,1	1	13,4	0,9	-8
486	2,03	24	0,79	Chute	1,1	1	13,4	0,9	-6
487	0,09	2	-10,46	Chute	1,1	1	13,4	1,1	-8
488	2,03	23	0,73	Chute	1,1	1	13,4	1,1	-6
489	0,4	1	-10,06	Chute	1,1	1	13,4	1,3	-8
490	2,03	23	0,73	Chute	1,1	1	13,4	1,3	-6
491	0,18	31	-7,82	Chute	1,1	1	13,6	0,1	-8
492	1,01	42	13,8	Chute	1,1	1	13,6	0,1	-6
493	0,45	27	-7,79	Chute	1,1	1	13,6	0,3	-8
494	1,28	38	9	Chute	1,1	1	13,6	0,3	-6
495	0,41	25	-7,79	Chute	1,1	1	13,6	0,5	-8
496	1,37	34	6,71	Chute	1,1	1	13,6	0,5	-6
497	0,39	22	-7,8	Chute	1,1	1	13,6	0,7	-8
498	1,39	31	5,41	Chute	1,1	1	13,6	0,7	-6
499	0,39	21	-7,81	Chute	1,1	1	13,6	0,9	-8
500	1,39	31	4,54	Chute	1,1	1	13,6	0,9	-6
501	0,39	21	-7,81	Chute	1,1	1	13,6	1,1	-8
502	1,39	31	4,14	Chute	1,1	1	13,6	1,1	-6
503	0,39	21	-7,81	Chute	1,1	1	13,6	1,3	-8
504	1,39	31	4,03	Chute	1,1	1	13,6	1,3	-6
505	0,25	37	-5,13	Chute	1,1	1	13,8	0,1	-8
506	0,8	43	15,89	Chute	1,1	1	13,8	0,1	-6
507	0,22	32	-5,14	Chute	1,1	1	13,8	0,3	-8
508	0,86	39	11,39	Chute	1,1	1	13,8	0,3	-6
509	0,22	31	-5,12	Chute	1,1	1	13,8	0,5	-8

Annexe 4

510	0,86	36	9,13	Chute	1,1	1	13,8	0,5	-6
511	0,22	31	-5,12	Chute	1,1	1	13,8	0,7	-8
512	0,86	36	7,77	Chute	1,1	1	13,8	0,7	-6
513	0,22	31	-5,12	Chute	1,1	1	13,8	0,9	-8
514	0,86	36	6,94	Chute	1,1	1	13,8	0,9	-6
515	0,22	31	-5,12	Chute	1,1	1	13,8	1,1	-8
516	0,86	36	6,53	Chute	1,1	1	13,8	1,1	-6
517	0,22	31	-5,12	Chute	1,1	1	13,8	1,3	-8
518	0,86	36	6,42	Chute	1,1	1	13,8	1,3	-6
519	0,61	43	-2,29	Chute	1,1	1	14	0,1	-8
520	0,67	44	/	Gauche	1,1	1	14	0,1	-6
521	0,62	40	-2,27	Chute	1,1	1	14	0,3	-8
522	0,67	42	13,94	Chute	1,1	1	14	0,3	-6
523	0,62	40	-2,27	Chute	1,1	1	14	0,5	-8
524	0,67	42	11,63	Chute	1,1	1	14	0,5	-6
525	0,62	40	-2,27	Chute	1,1	1	14	0,7	-8
526	0,67	42	10,35	Chute	1,1	1	14	0,7	-6
527	0,62	40	-2,27	Chute	1,1	1	14	0,9	-8
528	0,67	42	9,47	Chute	1,1	1	14	0,9	-6
529	0,62	40	-2,27	Chute	1,1	1	14	1,1	-8
530	0,67	42	9,08	Chute	1,1	1	14	1,1	-6
531	0,62	40	-2,27	Chute	1,1	1	14	1,3	-8
532	0,67	42	8,99	Chute	1,1	1	14	1,3	-6
533	0,65	51	0,58	Chute	1,1	1	14,2	0,1	-8
534	0,65	51	/	Gauche	1,1	1	14,2	0,1	-6
535	0,65	51	0,58	Chute	1,1	1	14,2	0,3	-8
536	0,65	51	/	Gauche	1,1	1	14,2	0,3	-6
537	0,65	51	0,58	Chute	1,1	1	14,2	0,5	-8
538	0,65	51	14,59	Chute	1,1	1	14,2	0,5	-6
539	0,65	51	0,58	Chute	1,1	1	14,2	0,7	-8
540	0,65	51	13,3	Chute	1,1	1	14,2	0,7	-6
541	0,65	51	0,58	Chute	1,1	1	14,2	0,9	-8
542	0,65	51	12,37	Chute	1,1	1	14,2	0,9	-6
543	0,65	51	0,58	Chute	1,1	1	14,2	1,1	-8
544	0,65	51	11,93	Chute	1,1	1	14,2	1,1	-6
545	0,65	51	0,58	Chute	1,1	1	14,2	1,3	-8
546	0,65	51	11,81	Chute	1,1	1	14,2	1,3	-6
547	0,65	51	3,44	Chute	1,1	1	14,4	0,1	-8
548	0,65	51	/	Gauche	1,1	1	14,4	0,1	-6
549	0,65	51	3,44	Chute	1,1	1	14,4	0,3	-8
550	0,65	51	/	Gauche	1,1	1	14,4	0,3	-6
551	0,65	51	3,44	Chute	1,1	1	14,4	0,5	-8

Annexe 4

552	0,65	51	/	Gauche	1,1	1	14,4	0,5	-6
553	0,65	51	3,44	Chute	1,1	1	14,4	0,7	-8
554	0,65	51	15,34	Chute	1,1	1	14,4	0,7	-6
555	0,65	51	3,44	Chute	1,1	1	14,4	0,9	-8
556	0,65	51	14,63	Chute	1,1	1	14,4	0,9	-6
557	0,65	51	3,44	Chute	1,1	1	14,4	1,1	-8
558	0,65	51	14,32	Chute	1,1	1	14,4	1,1	-6
559	0,65	51	3,44	Chute	1,1	1	14,4	1,3	-8
560	0,65	51	14,28	Chute	1,1	1	14,4	1,3	-6
561	2,59	38	-14,01	Chute	1,2	1	13	0,1	-8
562	2,2	40	7,24	Chute	1,2	1	13	0,1	-6
563	2,72	22	-14,03	Chute	1,2	1	13	0,3	-8
564	2,88	35	2,46	Chute	1,2	1	13	0,3	-6
565	1,36	1	-14,34	Chute	1,2	1	13	0,5	-8
566	3,11	24	-1,76	Chute	1,2	1	13	0,5	-6
567	2,91	2	-12,38	Chute	1,2	1	13	0,7	-8
568	3,21	20	-3,09	Chute	1,2	1	13	0,7	-6
569	2,93	1	-12,36	Chute	1,2	1	13	0,9	-8
570	3,66	16	-3,1	Chute	1,2	1	13	0,9	-6
571	3,89	1	-11,41	Chute	1,2	1	13	1,1	-8
572	3,8	15	-2,99	Chute	1,2	1	13	1,1	-6
573	4,77	2	-10,53	Chute	1,2	1	13	1,3	-8
574	3,81	14	-2,97	Chute	1,2	1	13	1,3	-6
575	2,54	37	-11,62	Chute	1,2	1	13,2	0,1	-8
576	2,11	41	7,59	Chute	1,2	1	13,2	0,1	-6
577	0,9	21	-12,59	Chute	1,2	1	13,2	0,3	-8
578	2,55	34	1,43	Chute	1,2	1	13,2	0,3	-6
579	0,14	4	-12,8	Chute	1,2	1	13,2	0,5	-8
580	2,51	25	-2,08	Chute	1,2	1	13,2	0,5	-6
581	0,04	-2	-12,78	Chute	1,2	1	13,2	0,7	-8
582	2,59	21	-2,74	Chute	1,2	1	13,2	0,7	-6
583	0,56	-4	-12,29	Chute	1,2	1	13,2	0,9	-8
584	2,68	18	-3,83	Chute	1,2	1	13,2	0,9	-6
585	1,53	0	-11,35	Chute	1,2	1	13,2	1,1	-8
586	2,68	18	-3,83	Chute	1,2	1	13,2	1,1	-6
587	2,61	2	-10,23	Chute	1,2	1	13,2	1,3	-8
588	2,69	16	-3,83	Chute	1,2	1	13,2	1,3	-6
589	0,94	28	-10,15	Chute	1,2	1	13,4	0,1	-8
590	1,95	41	8,1	Chute	1,2	1	13,4	0,1	-6
591	0,25	23	-10,24	Chute	1,2	1	13,4	0,3	-8
592	2,2	35	1,44	Chute	1,2	1	13,4	0,3	-6
593	0	21	-10,29	Chute	1,2	1	13,4	0,5	-8
594	2,25	27	-0,81	Chute	1,2	1	13,4	0,5	-6

Annexe 4

595	0,02	19	-10,28	Chute	1,2	1	13,4	0,7	-8
596	2,25	24	-1,47	Chute	1,2	1	13,4	0,7	-6
597	0,21	15	-10,24	Chute	1,2	1	13,4	0,9	-8
598	2,25	23	-1,28	Chute	1,2	1	13,4	0,9	-6
599	0,21	6	-10,49	Chute	1,2	1	13,4	1,1	-8
600	2,25	22	-1,28	Chute	1,2	1	13,4	1,1	-6
601	0,14	1	-10,15	Chute	1,2	1	13,4	1,3	-8
602	2,25	22	-1,28	Chute	1,2	1	13,4	1,3	-6
603	0,42	32	-7,65	Chute	1,2	1	13,6	0,1	-8
604	1,73	42	9,27	Chute	1,2	1	13,6	0,1	-6
605	0,25	26	-7,68	Chute	1,2	1	13,6	0,3	-8
606	1,9	37	3,91	Chute	1,2	1	13,6	0,3	-6
607	0,27	25	-7,68	Chute	1,2	1	13,6	0,5	-8
608	1,96	33	2,72	Chute	1,2	1	13,6	0,5	-6
609	0,31	23	-7,66	Chute	1,2	1	13,6	0,7	-8
610	1,96	31	2,33	Chute	1,2	1	13,6	0,7	-6
611	0,31	22	-7,66	Chute	1,2	1	13,6	0,9	-8
612	1,96	31	2,22	Chute	1,2	1	13,6	0,9	-6
613	0,31	22	-7,66	Chute	1,2	1	13,6	1,1	-8
614	1,96	31	2,22	Chute	1,2	1	13,6	1,1	-6
615	0,31	22	-7,66	Chute	1,2	1	13,6	1,3	-8
616	1,96	31	2,22	Chute	1,2	1	13,6	1,3	-6
617	0,98	37	-4,91	Chute	1,2	1	13,8	0,1	-8
618	1,52	43	11,73	Chute	1,2	1	13,8	0,1	-6
619	0,96	32	-4,91	Chute	1,2	1	13,8	0,3	-8
620	1,57	39	8,69	Chute	1,2	1	13,8	0,3	-6
621	0,97	32	-4,91	Chute	1,2	1	13,8	0,5	-8
622	1,57	37	7,17	Chute	1,2	1	13,8	0,5	-6
623	0,97	32	-4,91	Chute	1,2	1	13,8	0,7	-8
624	1,57	37	6,33	Chute	1,2	1	13,8	0,7	-6
625	0,97	32	-4,91	Chute	1,2	1	13,8	0,9	-8
626	1,57	37	5,9	Chute	1,2	1	13,8	0,9	-6
627	0,97	32	-4,91	Chute	1,2	1	13,8	1,1	-8
628	1,57	37	5,77	Chute	1,2	1	13,8	1,1	-6
629	0,97	32	-4,91	Chute	1,2	1	13,8	1,3	-8
630	1,57	37	5,78	Chute	1,2	1	13,8	1,3	-6
631	1,37	43	-1,94	Chute	1,2	1	14	0,1	-8
632	1,41	45	13,66	Chute	1,2	1	14	0,1	-6
633	1,37	41	-1,93	Chute	1,2	1	14	0,3	-8
634	1,41	43	10,6	Chute	1,2	1	14	0,3	-6
635	1,37	41	-1,93	Chute	1,2	1	14	0,5	-8
636	1,41	43	9,26	Chute	1,2	1	14	0,5	-6
637	1,37	41	-1,93	Chute	1,2	1	14	0,7	-8

Annexe 4

638	1,41	43	8,54	Chute	1,2	1	14	0,7	-6
639	1,37	41	-1,93	Chute	1,2	1	14	0,9	-8
640	1,41	43	8,19	Chute	1,2	1	14	0,9	-6
641	1,37	41	-1,93	Chute	1,2	1	14	1,1	-8
642	1,41	43	8,13	Chute	1,2	1	14	1,1	-6
643	1,37	41	-1,93	Chute	1,2	1	14	1,3	-8
644	1,41	43	8,13	Chute	1,2	1	14	1,3	-6
645	1,4	51	0,96	Chute	1,2	1	14,2	0,1	-8
646	1,4	51	15,41	Chute	1,2	1	14,2	0,1	-6
647	1,4	51	0,96	Chute	1,2	1	14,2	0,3	-8
648	1,4	51	12,61	Chute	1,2	1	14,2	0,3	-6
649	1,4	51	0,96	Chute	1,2	1	14,2	0,5	-8
650	1,4	51	11,46	Chute	1,2	1	14,2	0,5	-6
651	1,4	51	0,96	Chute	1,2	1	14,2	0,7	-8
652	1,4	51	10,89	Chute	1,2	1	14,2	0,7	-6
653	1,4	51	0,96	Chute	1,2	1	14,2	0,9	-8
654	1,4	51	10,63	Chute	1,2	1	14,2	0,9	-6
655	1,4	51	0,96	Chute	1,2	1	14,2	1,1	-8
656	1,4	51	10,6	Chute	1,2	1	14,2	1,1	-6
657	1,4	51	0,96	Chute	1,2	1	14,2	1,3	-8
658	1,4	51	10,6	Chute	1,2	1	14,2	1,3	-6
659	1,4	51	3,81	Chute	1,2	1	14,4	0,1	-8
660	1,4	51	16,43	Chute	1,2	1	14,4	0,1	-6
661	1,4	51	3,81	Chute	1,2	1	14,4	0,3	-8
662	1,4	51	14,36	Chute	1,2	1	14,4	0,3	-6
663	1,4	51	3,81	Chute	1,2	1	14,4	0,5	-8
664	1,4	51	13,42	Chute	1,2	1	14,4	0,5	-6
665	1,4	51	3,81	Chute	1,2	1	14,4	0,7	-8
666	1,4	51	12,95	Chute	1,2	1	14,4	0,7	-6
667	1,4	51	3,81	Chute	1,2	1	14,4	0,9	-8
668	1,4	51	12,76	Chute	1,2	1	14,4	0,9	-6
669	1,4	51	3,81	Chute	1,2	1	14,4	1,1	-8
670	1,4	51	12,77	Chute	1,2	1	14,4	1,1	-6
671	1,4	51	3,81	Chute	1,2	1	14,4	1,3	-8
672	1,4	51	12,77	Chute	1,2	1	14,4	1,3	-6
673	3,1	33	-13,87	Chute	1,3	1	13	0,1	-8
674	2,28	32	-3,91	Chute	1,3	1	13	0,1	-6
675	3,25	23	-13,6	Chute	1,3	1	13	0,3	-8
676	2,36	28	-4,5	Chute	1,3	1	13	0,3	-6
677	2,22	5	-14,07	Chute	1,3	1	13	0,5	-8
678	2,56	23	-5,09	Chute	1,3	1	13	0,5	-6
679	2,8	0	-12,53	Chute	1,3	1	13	0,7	-8
680	3,07	19	-4,71	Chute	1,3	1	13	0,7	-6

681	2,61	-2	-12,64	Chute	1,3	1	13	0,9	-8
682	3,6	16	-4,12	Chute	1,3	1	13	0,9	-6
683	3,87	1	-11,46	Chute	1,3	1	13	1,1	-8
684	3,67	15	-4,01	Chute	1,3	1	13	1,1	-6
685	4,76	2	-10,56	Chute	1,3	1	13	1,3	-8
686	3,71	14	-3,92	Chute	1,3	1	13	1,3	-6
687	2,17	33	-12,23	Chute	1,3	1	13,2	0,1	-8
688	2,16	35	-3,39	Chute	1,3	1	13,2	0,1	-6
689	2,15	23	-12,22	Chute	1,3	1	13,2	0,3	-8
690	2,22	30	-4,41	Chute	1,3	1	13,2	0,3	-6
691	1,81	18	-12,09	Chute	1,3	1	13,2	0,5	-8
692	2,33	24	-4,72	Chute	1,3	1	13,2	0,5	-6
693	1,53	6	-12,1	Chute	1,3	1	13,2	0,7	-8
694	2,61	20	-4,37	Chute	1,3	1	13,2	0,7	-6
695	1,5	3	-12,1	Chute	1,3	1	13,2	0,9	-8
696	2,67	20	-4,26	Chute	1,3	1	13,2	0,9	-6
697	2,22	5	-11,14	Chute	1,3	1	13,2	1,1	-8
698	2,71	19	-4,2	Chute	1,3	1	13,2	1,1	-6
699	2,78	6	-10,42	Chute	1,3	1	13,2	1,3	-8
700	2,72	17	-4,17	Chute	1,3	1	13,2	1,3	-6
701	1,83	31	-9,93	Chute	1,3	1	13,4	0,1	-8
702	2,12	36	-3,15	Chute	1,3	1	13,4	0,1	-6
703	1,01	24	-10,05	Chute	1,3	1	13,4	0,3	-8
704	2,15	30	-4,02	Chute	1,3	1	13,4	0,3	-6
705	0,72	19	-10,2	Chute	1,3	1	13,4	0,5	-8
706	2,24	25	-4,12	Chute	1,3	1	13,4	0,5	-6
707	0,68	18	-10,23	Chute	1,3	1	13,4	0,7	-8
708	2,24	24	-4,11	Chute	1,3	1	13,4	0,7	-6
709	0,85	15	-10,15	Chute	1,3	1	13,4	0,9	-8
710	2,25	23	-4,1	Chute	1,3	1	13,4	0,9	-6
711	1,04	10	-9,96	Chute	1,3	1	13,4	1,1	-8
712	2,25	22	-4,08	Chute	1,3	1	13,4	1,1	-6
713	0,52	4	-10,67	Chute	1,3	1	13,4	1,3	-8
714	2,25	22	-4,08	Chute	1,3	1	13,4	1,3	-6
715	0,92	32	-7,61	Chute	1,3	1	13,6	0,1	-8
716	2,04	37	-2,55	Chute	1,3	1	13,6	0,1	-6
717	0,84	26	-7,67	Chute	1,3	1	13,6	0,3	-8
718	2,11	32	-3,04	Chute	1,3	1	13,6	0,3	-6
719	0,85	25	-7,67	Chute	1,3	1	13,6	0,5	-8
720	2,12	29	-3,15	Chute	1,3	1	13,6	0,5	-6
721	0,88	24	-7,64	Chute	1,3	1	13,6	0,7	-8
722	2,12	29	-3,15	Chute	1,3	1	13,6	0,7	-6
723	0,89	23	-7,61	Chute	1,3	1	13,6	0,9	-8

724	2,12	29	-3,15	Chute	1,3	1	13,6	0,9	-6
725	0,89	23	-7,61	Chute	1,3	1	13,6	1,1	-8
726	2,12	29	-3,15	Chute	1,3	1	13,6	1,1	-6
727	0,89	23	-7,61	Chute	1,3	1	13,6	1,3	-8
728	2,12	29	-3,15	Chute	1,3	1	13,6	1,3	-6
729	1,43	36	-4,81	Chute	1,3	1	13,8	0,1	-8
730	1,97	41	-1,45	Chute	1,3	1	13,8	0,1	-6
731	1,41	33	-4,85	Chute	1,3	1	13,8	0,3	-8
732	2	37	-1,36	Chute	1,3	1	13,8	0,3	-6
733	1,42	32	-4,85	Chute	1,3	1	13,8	0,5	-8
734	2	37	-1,34	Chute	1,3	1	13,8	0,5	-6
735	1,42	32	-4,85	Chute	1,3	1	13,8	0,7	-8
736	2	37	-1,34	Chute	1,3	1	13,8	0,7	-6
737	1,42	32	-4,85	Chute	1,3	1	13,8	0,9	-8
738	2	37	-1,34	Chute	1,3	1	13,8	0,9	-6
739	1,42	32	-4,85	Chute	1,3	1	13,8	1,1	-8
740	2	37	-1,34	Chute	1,3	1	13,8	1,1	-6
741	1,42	32	-4,85	Chute	1,3	1	13,8	1,3	-8
742	2	37	-1,34	Chute	1,3	1	13,8	1,3	-6
743	1,84	43	-1,78	Chute	1,3	1	14	0,1	-8
744	1,87	43	4,22	Chute	1,3	1	14	0,1	-6
745	1,84	42	-1,77	Chute	1,3	1	14	0,3	-8
746	1,87	42	3,64	Chute	1,3	1	14	0,3	-6
747	1,84	42	-1,77	Chute	1,3	1	14	0,5	-8
748	1,87	42	3,58	Chute	1,3	1	14	0,5	-6
749	1,84	42	-1,77	Chute	1,3	1	14	0,7	-8
750	1,87	42	3,58	Chute	1,3	1	14	0,7	-6
751	1,84	42	-1,77	Chute	1,3	1	14	0,9	-8
752	1,87	42	3,58	Chute	1,3	1	14	0,9	-6
753	1,84	42	-1,77	Chute	1,3	1	14	1,1	-8
754	1,87	42	3,58	Chute	1,3	1	14	1,1	-6
755	1,84	42	-1,77	Chute	1,3	1	14	1,3	-8
756	1,87	42	3,58	Chute	1,3	1	14	1,3	-6
757	1,86	49	1,08	Chute	1,3	1	14,2	0,1	-8
758	1,86	49	2,77	Chute	1,3	1	14,2	0,1	-6
759	1,86	49	1,08	Chute	1,3	1	14,2	0,3	-8
760	1,86	49	2,83	Chute	1,3	1	14,2	0,3	-6
761	1,86	49	1,08	Chute	1,3	1	14,2	0,5	-8
762	1,86	49	2,83	Chute	1,3	1	14,2	0,5	-6
763	1,86	49	1,08	Chute	1,3	1	14,2	0,7	-8
764	1,86	49	2,83	Chute	1,3	1	14,2	0,7	-6
765	1,86	49	1,08	Chute	1,3	1	14,2	0,9	-8
766	1,86	49	2,83	Chute	1,3	1	14,2	0,9	-6

Annexe 4

767	1,86	49	1,08	Chute	1,3	1	14,2	1,1	-8
768	1,86	49	2,83	Chute	1,3	1	14,2	1,1	-6
769	1,86	49	1,08	Chute	1,3	1	14,2	1,3	-8
770	1,86	49	2,83	Chute	1,3	1	14,2	1,3	-6
771	1,86	49	2,39	Chute	1,3	1	14,4	0,1	-8
772	1,86	49	2,39	Chute	1,3	1	14,4	0,1	-6
773	1,86	49	2,39	Chute	1,3	1	14,4	0,3	-8
774	1,86	49	2,39	Chute	1,3	1	14,4	0,3	-6
775	1,86	49	2,39	Chute	1,3	1	14,4	0,5	-8
776	1,86	49	2,39	Chute	1,3	1	14,4	0,5	-6
777	1,86	49	2,39	Chute	1,3	1	14,4	0,7	-8
778	1,86	49	2,39	Chute	1,3	1	14,4	0,7	-6
779	1,86	49	2,39	Chute	1,3	1	14,4	0,9	-8
780	1,86	49	2,39	Chute	1,3	1	14,4	0,9	-6
781	1,86	49	2,39	Chute	1,3	1	14,4	1,1	-8
782	1,86	49	2,39	Chute	1,3	1	14,4	1,1	-6
783	1,86	49	2,39	Chute	1,3	1	14,4	1,3	-8
784	1,86	49	2,39	Chute	1,3	1	14,4	1,3	-6

Ecart_choc >2m
Ecart_chute < -2m
Ecart_chute > 2m
Tri visuel

Num	Ecart_choc	Vitesse_choc	Ecart_chute	Sens	Couple	Vitesse	Deb_frein	Durée_frein	Decel
1	1,75	37	-16,69	Chute	0,7	1	13	0,1	-8
2	2,49	41	/	Droite	0,7	1	13	0,1	-6
3	4,7	11	-17,84	Chute	0,7	1	13	0,3	-8
4	1,73	37	/	Droite	0,7	1	13	0,3	-6
5	4,63	6	-16,06	Chute	0,7	1	13	0,5	-8
6	0,73	33	/	Droite	0,7	1	13	0,5	-6
7	4,48	6	-14,34	Chute	0,7	1	13	0,7	-8
8	0,46	28	/	Gauche	0,7	1	13	0,7	-6
9	4,66	4	-14,17	Chute	0,7	1	13	0,9	-8
10	1,8	24	/	Gauche	0,7	1	13	0,9	-6
11	4,4	7	-12,66	Chute	0,7	1	13	1,1	-8
12	3,01	20	/	Gauche	0,7	1	13	1,1	-6
13	6,61	3	-10,36	Chute	0,7	1	13	1,3	-8
14	3,76	16	2,08	Chute	0,7	1	13	1,3	-6
15	2,16	39	-14,35	Chute	0,7	1	13,2	0,1	-8
16	2,62	42	/	Droite	0,7	1	13,2	0,1	-6

Annexe 4

17	3,09	19	-13,96	Chute	0,7	1	13,2	0,3	-8
18	2,01	37	/	Droite	0,7	1	13,2	0,3	-6
19	3,87	11	-15,06	Chute	0,7	1	13,2	0,5	-8
20	1,23	33	/	Droite	0,7	1	13,2	0,5	-6
21	3,38	5	-13,25	Chute	0,7	1	13,2	0,7	-8
22	0,38	29	/	Droite	0,7	1	13,2	0,7	-6
23	4,47	5	-13,68	Chute	0,7	1	13,2	0,9	-8
24	0,45	24	/	Gauche	0,7	1	13,2	0,9	-6
25	3,38	5	-12,48	Chute	0,7	1	13,2	1,1	-8
26	1,11	20	/	Gauche	0,7	1	13,2	1,1	-6
27	4,29	4	-10,4	Chute	0,7	1	13,2	1,3	-8
28	1,55	16	3,82	Chute	0,7	1	13,2	1,3	-6
29	2,3	39	-11,91	Chute	0,7	1	13,4	0,1	-8
30	2,77	42	/	Droite	0,7	1	13,4	0,1	-6
31	3,71	22	-11,34	Chute	0,7	1	13,4	0,3	-8
32	2,28	38	/	Droite	0,7	1	13,4	0,3	-6
33	4,14	19	-11,03	Chute	0,7	1	13,4	0,5	-8
34	1,77	33	/	Droite	0,7	1	13,4	0,5	-6
35	4,23	17	-10,78	Chute	0,7	1	13,4	0,7	-8
36	1,31	29	/	Droite	0,7	1	13,4	0,7	-6
37	3,66	5	-13,03	Chute	0,7	1	13,4	0,9	-8
38	0,97	25	/	Droite	0,7	1	13,4	0,9	-6
39	3,2	6	-12,29	Chute	0,7	1	13,4	1,1	-8
40	0,75	21	/	Droite	0,7	1	13,4	1,1	-6
41	3,41	2	-10,45	Chute	0,7	1	13,4	1,3	-8
42	0,63	17	/	Droite	0,7	1	13,4	1,3	-6
43	2,46	34	-9,46	Chute	0,7	1	13,6	0,1	-8
44	2,92	43	/	Droite	0,7	1	13,6	0,1	-6
45	3,88	26	-8,16	Chute	0,7	1	13,6	0,3	-8
46	2,61	38	/	Droite	0,7	1	13,6	0,3	-6
47	3,9	23	-7,95	Chute	0,7	1	13,6	0,5	-8
48	2,38	34	/	Droite	0,7	1	13,6	0,5	-6
49	3,89	22	-7,89	Chute	0,7	1	13,6	0,7	-8
50	2,26	30	/	Droite	0,7	1	13,6	0,7	-6
51	3,89	20	-7,87	Chute	0,7	1	13,6	0,9	-8
52	2,21	26	/	Droite	0,7	1	13,6	0,9	-6
53	3,89	20	-7,87	Chute	0,7	1	13,6	1,1	-8
54	2,2	23	/	Droite	0,7	1	13,6	1,1	-6
55	3,89	20	-7,87	Chute	0,7	1	13,6	1,3	-8
56	2,2	23	/	Droite	0,7	1	13,6	1,3	-6
57	3,38	36	-5,94	Chute	0,7	1	13,8	0,1	-8
58	3,08	44	/	Droite	0,7	1	13,8	0,1	-6
59	3,56	31	-5,59	Chute	0,7	1	13,8	0,3	-8

Annexe 4

60	2,96	39	/	Droite	0,7	1	13,8	0,3	-6
61	3,54	29	-5,61	Chute	0,7	1	13,8	0,5	-8
62	2,93	34	/	Droite	0,7	1	13,8	0,5	-6
63	3,54	29	-5,64	Chute	0,7	1	13,8	0,7	-8
64	2,92	32	/	Droite	0,7	1	13,8	0,7	-6
65	3,54	29	-5,64	Chute	0,7	1	13,8	0,9	-8
66	2,92	32	/	Droite	0,7	1	13,8	0,9	-6
67	3,54	29	-5,64	Chute	0,7	1	13,8	1,1	-8
68	2,92	32	/	Droite	0,7	1	13,8	1,1	-6
69	3,54	29	-5,64	Chute	0,7	1	13,8	1,3	-8
70	2,92	32	/	Droite	0,7	1	13,8	1,3	-6
71	3,29	41	-3,31	Chute	0,7	1	14	0,1	-8
72	3,2	44	/	Droite	0,7	1	14	0,1	-6
73	3,27	37	-3,28	Chute	0,7	1	14	0,3	-8
74	3,19	39	/	Droite	0,7	1	14	0,3	-6
75	3,27	37	-3,28	Chute	0,7	1	14	0,5	-8
76	3,19	39	/	Droite	0,7	1	14	0,5	-6
77	3,27	37	-3,28	Chute	0,7	1	14	0,7	-8
78	3,19	39	/	Droite	0,7	1	14	0,7	-6
79	3,27	37	-3,28	Chute	0,7	1	14	0,9	-8
80	3,19	39	/	Droite	0,7	1	14	0,9	-6
81	3,27	37	-3,28	Chute	0,7	1	14	1,1	-8
82	3,19	39	/	Droite	0,7	1	14	1,1	-6
83	3,27	37	-3,28	Chute	0,7	1	14	1,3	-8
84	3,19	39	/	Droite	0,7	1	14	1,3	-6
85	3,24	48	-0,55	Chute	0,7	1	14,2	0,1	-8
86	3,23	48	/	Droite	0,7	1	14,2	0,1	-6
87	3,24	48	-0,55	Chute	0,7	1	14,2	0,3	-8
88	3,23	48	/	Droite	0,7	1	14,2	0,3	-6
89	3,24	48	-0,55	Chute	0,7	1	14,2	0,5	-8
90	3,23	48	/	Droite	0,7	1	14,2	0,5	-6
91	3,24	48	-0,55	Chute	0,7	1	14,2	0,7	-8
92	3,23	48	/	Droite	0,7	1	14,2	0,7	-6
93	3,24	48	-0,55	Chute	0,7	1	14,2	0,9	-8
94	3,23	48	/	Droite	0,7	1	14,2	0,9	-6
95	3,24	48	-0,55	Chute	0,7	1	14,2	1,1	-8
96	3,23	48	/	Droite	0,7	1	14,2	1,1	-6
97	3,24	48	-0,55	Chute	0,7	1	14,2	1,3	-8
98	3,23	48	/	Droite	0,7	1	14,2	1,3	-6
99	3,23	51	2,29	Chute	0,7	1	14,4	0,1	-8
100	3,23	51	/	Droite	0,7	1	14,4	0,1	-6
101	3,23	51	2,29	Chute	0,7	1	14,4	0,3	-8
102	3,23	51	/	Droite	0,7	1	14,4	0,3	-6

Annexe 4

103	3,23	51	2,29	Chute	0,7	1	14,4	0,5	-8
104	3,23	51	/	Droite	0,7	1	14,4	0,5	-6
105	3,23	51	2,29	Chute	0,7	1	14,4	0,7	-8
106	3,23	51	/	Droite	0,7	1	14,4	0,7	-6
107	3,23	51	2,29	Chute	0,7	1	14,4	0,9	-8
108	3,23	51	/	Droite	0,7	1	14,4	0,9	-6
109	3,23	51	2,29	Chute	0,7	1	14,4	1,1	-8
110	3,23	51	/	Droite	0,7	1	14,4	1,1	-6
111	3,23	51	2,29	Chute	0,7	1	14,4	1,3	-8
112	3,23	51	/	Droite	0,7	1	14,4	1,3	-6
113	0,65	38	-16,2	Chute	0,8	1	13	0,1	-8
114	1,29	41	/	Droite	0,8	1	13	0,1	-6
115	3,13	16	-16,61	Chute	0,8	1	13	0,3	-8
116	0,51	37	/	Droite	0,8	1	13	0,3	-6
117	2,67	5	-15,51	Chute	0,8	1	13	0,5	-8
118	0,5	33	/	Gauche	0,8	1	13	0,5	-6
119	2,59	10	-15,05	Chute	0,8	1	13	0,7	-8
120	1,65	28	/	Gauche	0,8	1	13	0,7	-6
121	3,44	8	-14,69	Chute	0,8	1	13	0,9	-8
122	2,81	24	3,77	Chute	0,8	1	13	0,9	-6
123	4,48	2	-12,14	Chute	0,8	1	13	1,1	-8
124	3,62	20	1,48	Chute	0,8	1	13	1,1	-6
125	5,87	2	-10,77	Chute	0,8	1	13	1,3	-8
126	3,99	17	0,68	Chute	0,8	1	13	1,3	-6
127	0,95	39	-13,86	Chute	0,8	1	13,2	0,1	-8
128	1,42	41	/	Droite	0,8	1	13,2	0,1	-6
129	1,64	20	-13,93	Chute	0,8	1	13,2	0,3	-8
130	0,78	37	/	Droite	0,8	1	13,2	0,3	-6
131	3,06	13	-13,29	Chute	0,8	1	13,2	0,5	-8
132	0,01	33	/	Gauche	0,8	1	13,2	0,5	-6
133	2,25	6	-13,43	Chute	0,8	1	13,2	0,7	-8
134	0,81	29	/	Gauche	0,8	1	13,2	0,7	-6
135	2,11	6	-13,47	Chute	0,8	1	13,2	0,9	-8
136	1,46	24	5,38	Chute	0,8	1	13,2	0,9	-6
137	1,67	7	-12,86	Chute	0,8	1	13,2	1,1	-8
138	1,85	21	3,24	Chute	0,8	1	13,2	1,1	-6
139	3,8	2	-10,58	Chute	0,8	1	13,2	1,3	-8
140	2,04	17	1,94	Chute	0,8	1	13,2	1,3	-6
141	1,05	39	-11,4	Chute	0,8	1	13,4	0,1	-8
142	1,57	42	/	Droite	0,8	1	13,4	0,1	-6
143	2,64	21	-11,43	Chute	0,8	1	13,4	0,3	-8
144	1,06	38	/	Droite	0,8	1	13,4	0,3	-6
145	3,08	20	-10,83	Chute	0,8	1	13,4	0,5	-8

Annexe 4

146	0,55	33	/	Droite	0,8	1	13,4	0,5	-6
147	3,08	18	-10,9	Chute	0,8	1	13,4	0,7	-8
148	0,17	29	/	Droite	0,8	1	13,4	0,7	-6
149	2,78	9	-11,4	Chute	0,8	1	13,4	0,9	-8
150	0,06	25	/	Gauche	0,8	1	13,4	0,9	-6
151	2,68	9	-11,28	Chute	0,8	1	13,4	1,1	-8
152	0,16	21	5,43	Chute	0,8	1	13,4	1,1	-6
153	2,77	-1	-10,63	Chute	0,8	1	13,4	1,3	-8
154	0,19	17	3,68	Chute	0,8	1	13,4	1,3	-6
155	2,19	33	-8,46	Chute	0,8	1	13,6	0,1	-8
156	1,74	43	/	Droite	0,8	1	13,6	0,1	-6
157	2,83	26	-8,12	Chute	0,8	1	13,6	0,3	-8
158	1,41	38	/	Droite	0,8	1	13,6	0,3	-6
159	2,84	23	-7,94	Chute	0,8	1	13,6	0,5	-8
160	1,21	34	/	Droite	0,8	1	13,6	0,5	-6
161	2,83	21	-7,86	Chute	0,8	1	13,6	0,7	-8
162	1,13	30	/	Droite	0,8	1	13,6	0,7	-6
163	2,82	19	-7,98	Chute	0,8	1	13,6	0,9	-8
164	1,1	26	/	Droite	0,8	1	13,6	0,9	-6
165	2,82	19	-7,98	Chute	0,8	1	13,6	1,1	-8
166	1,1	26	/	Droite	0,8	1	13,6	1,1	-6
167	2,82	19	-7,98	Chute	0,8	1	13,6	1,3	-8
168	1,1	26	/	Droite	0,8	1	13,6	1,3	-6
169	2,33	36	-5,7	Chute	0,8	1	13,8	0,1	-8
170	1,91	44	/	Droite	0,8	1	13,8	0,1	-6
171	2,45	31	-5,52	Chute	0,8	1	13,8	0,3	-8
172	1,8	39	/	Droite	0,8	1	13,8	0,3	-6
173	2,43	30	-5,56	Chute	0,8	1	13,8	0,5	-8
174	1,78	34	/	Droite	0,8	1	13,8	0,5	-6
175	2,43	30	-5,56	Chute	0,8	1	13,8	0,7	-8
176	1,77	33	/	Droite	0,8	1	13,8	0,7	-6
177	2,43	30	-5,56	Chute	0,8	1	13,8	0,9	-8
178	1,77	33	/	Droite	0,8	1	13,8	0,9	-6
179	2,43	30	-5,56	Chute	0,8	1	13,8	1,1	-8
180	1,77	33	/	Droite	0,8	1	13,8	1,1	-6
181	2,43	30	-5,56	Chute	0,8	1	13,8	1,3	-8
182	1,77	33	/	Droite	0,8	1	13,8	1,3	-6
183	2,14	42	-3,11	Chute	0,8	1	14	0,1	-8
184	2,04	44	/	Droite	0,8	1	14	0,1	-6
185	2,12	38	-3,11	Chute	0,8	1	14	0,3	-8
186	2,03	40	/	Droite	0,8	1	14	0,3	-6
187	2,12	38	-3,11	Chute	0,8	1	14	0,5	-8
188	2,03	40	/	Droite	0,8	1	14	0,5	-6

Annexe 4

189	2,12	38	-3,11	Chute	0,8	1	14	0,7	-8
190	2,03	40	/	Droite	0,8	1	14	0,7	-6
191	2,12	38	-3,11	Chute	0,8	1	14	0,9	-8
192	2,03	40	/	Droite	0,8	1	14	0,9	-6
193	2,12	38	-3,11	Chute	0,8	1	14	1,1	-8
194	2,03	40	/	Droite	0,8	1	14	1,1	-6
195	2,12	38	-3,11	Chute	0,8	1	14	1,3	-8
196	2,03	40	/	Droite	0,8	1	14	1,3	-6
197	2,08	49	-0,36	Chute	0,8	1	14,2	0,1	-8
198	2,07	49	/	Droite	0,8	1	14,2	0,1	-6
199	2,08	49	-0,36	Chute	0,8	1	14,2	0,3	-8
200	2,07	49	/	Droite	0,8	1	14,2	0,3	-6
201	2,08	49	-0,36	Chute	0,8	1	14,2	0,5	-8
202	2,07	49	/	Droite	0,8	1	14,2	0,5	-6
203	2,08	49	-0,36	Chute	0,8	1	14,2	0,7	-8
204	2,07	49	/	Droite	0,8	1	14,2	0,7	-6
205	2,08	49	-0,36	Chute	0,8	1	14,2	0,9	-8
206	2,07	49	/	Droite	0,8	1	14,2	0,9	-6
207	2,08	49	-0,36	Chute	0,8	1	14,2	1,1	-8
208	2,07	49	/	Droite	0,8	1	14,2	1,1	-6
209	2,08	49	-0,36	Chute	0,8	1	14,2	1,3	-8
210	2,07	49	/	Droite	0,8	1	14,2	1,3	-6
211	2,08	51	2,5	Chute	0,8	1	14,4	0,1	-8
212	2,08	51	/	Droite	0,8	1	14,4	0,1	-6
213	2,08	51	2,5	Chute	0,8	1	14,4	0,3	-8
214	2,08	51	/	Droite	0,8	1	14,4	0,3	-6
215	2,08	51	2,5	Chute	0,8	1	14,4	0,5	-8
216	2,08	51	/	Droite	0,8	1	14,4	0,5	-6
217	2,08	51	2,5	Chute	0,8	1	14,4	0,7	-8
218	2,08	51	/	Droite	0,8	1	14,4	0,7	-6
219	2,08	51	2,5	Chute	0,8	1	14,4	0,9	-8
220	2,08	51	/	Droite	0,8	1	14,4	0,9	-6
221	2,08	51	2,5	Chute	0,8	1	14,4	1,1	-8
222	2,08	51	/	Droite	0,8	1	14,4	1,1	-6
223	2,08	51	2,5	Chute	0,8	1	14,4	1,3	-8
224	2,08	51	/	Droite	0,8	1	14,4	1,3	-6
225	0,31	38	-15,64	Chute	0,9	1	13	0,1	-8
226	0,25	41	/	Droite	0,9	1	13	0,1	-6
227	0,78	17	-16,1	Chute	0,9	1	13	0,3	-8
228	0,55	37	/	Gauche	0,9	1	13	0,3	-6
229	2,92	0	-15,05	Chute	0,9	1	13	0,5	-8
230	1,55	33	8,64	Chute	0,9	1	13	0,5	-6
231	1,8	5	-14,72	Chute	0,9	1	13	0,7	-8

Annexe 4

232	2,62	28	4,26	Chute	0,9	1	13	0,7	-6
233	1,88	9	-14,46	Chute	0,9	1	13	0,9	-8
234	3,38	22	0,43	Chute	0,9	1	13	0,9	-6
235	2,9	3	-12,9	Chute	0,9	1	13	1,1	-8
236	3,39	8	-2,43	Chute	0,9	1	13	1,1	-6
237	5,04	3	-10,81	Chute	0,9	1	13	1,3	-8
238	3,38	6	-2,39	Chute	0,9	1	13	1,3	-6
239	0,12	39	-13,28	Chute	0,9	1	13,2	0,1	-8
240	0,37	41	/	Droite	0,9	1	13,2	0,1	-6
241	0,62	20	-13,52	Chute	0,9	1	13,2	0,3	-8
242	0,29	37	/	Gauche	0,9	1	13,2	0,3	-6
243	2,12	10	-13,27	Chute	0,9	1	13,2	0,5	-8
244	1,06	33	9,32	Chute	0,9	1	13,2	0,5	-6
245	2,47	11	-13,14	Chute	0,9	1	13,2	0,7	-8
246	1,77	28	5,14	Chute	0,9	1	13,2	0,7	-6
247	2,31	2	-12,88	Chute	0,9	1	13,2	0,9	-8
248	2,22	24	2,83	Chute	0,9	1	13,2	0,9	-6
249	2,15	0	-11,91	Chute	0,9	1	13,2	1,1	-8
250	2,43	21	1,78	Chute	0,9	1	13,2	1,1	-6
251	3,07	-1	-10,7	Chute	0,9	1	13,2	1,3	-8
252	2,5	17	1,23	Chute	0,9	1	13,2	1,3	-6
253	0,06	39	-10,83	Chute	0,9	1	13,4	0,1	-8
254	0,52	42	/	Droite	0,9	1	13,4	0,1	-6
255	1,67	22	-11,11	Chute	0,9	1	13,4	0,3	-8
256	0,01	37	/	Gauche	0,9	1	13,4	0,3	-6
257	2,16	21	-10,69	Chute	0,9	1	13,4	0,5	-8
258	0,48	33	10,71	Chute	0,9	1	13,4	0,5	-6
259	2,16	19	-10,7	Chute	0,9	1	13,4	0,7	-8
260	0,78	29	7,14	Chute	0,9	1	13,4	0,7	-6
261	1,81	14	-11,04	Chute	0,9	1	13,4	0,9	-8
262	0,91	25	5,01	Chute	0,9	1	13,4	0,9	-6
263	1,57	5	-11,29	Chute	0,9	1	13,4	1,1	-8
264	0,94	21	3,65	Chute	0,9	1	13,4	1,1	-6
265	1,84	-1	-10,35	Chute	0,9	1	13,4	1,3	-8
266	0,94	20	2,78	Chute	0,9	1	13,4	1,3	-6
267	1,5	32	-8,22	Chute	0,9	1	13,6	0,1	-8
268	0,7	43	/	Droite	0,9	1	13,6	0,1	-6
269	1,92	26	-8,05	Chute	0,9	1	13,6	0,3	-8
270	0,38	38	/	Droite	0,9	1	13,6	0,3	-6
271	1,92	24	-7,93	Chute	0,9	1	13,6	0,5	-8
272	0,21	34	/	Droite	0,9	1	13,6	0,5	-6
273	1,91	21	-7,88	Chute	0,9	1	13,6	0,7	-8
274	0,16	30	/	Droite	0,9	1	13,6	0,7	-6

Annexe 4

275	1,88	19	-8,14	Chute	0,9	1	13,6	0,9	-8
276	0,16	28	7,68	Chute	0,9	1	13,6	0,9	-6
277	1,88	19	-8,14	Chute	0,9	1	13,6	1,1	-8
278	0,16	28	6,13	Chute	0,9	1	13,6	1,1	-6
279	1,88	19	-8,14	Chute	0,9	1	13,6	1,3	-8
280	0,16	28	5,18	Chute	0,9	1	13,6	1,3	-6
281	1,39	36	-5,48	Chute	0,9	1	13,8	0,1	-8
282	0,89	43	/	Droite	0,9	1	13,8	0,1	-6
283	1,46	32	-5,42	Chute	0,9	1	13,8	0,3	-8
284	0,8	39	/	Droite	0,9	1	13,8	0,3	-6
285	1,44	30	-5,48	Chute	0,9	1	13,8	0,5	-8
286	0,78	35	/	Droite	0,9	1	13,8	0,5	-6
287	1,44	30	-5,48	Chute	0,9	1	13,8	0,7	-8
288	0,78	34	/	Droite	0,9	1	13,8	0,7	-6
289	1,44	30	-5,48	Chute	0,9	1	13,8	0,9	-8
290	0,78	34	/	Droite	0,9	1	13,8	0,9	-6
291	1,44	30	-5,48	Chute	0,9	1	13,8	1,1	-8
292	0,78	34	/	Droite	0,9	1	13,8	1,1	-6
293	1,44	30	-5,48	Chute	0,9	1	13,8	1,3	-8
294	0,78	34	8,13	Chute	0,9	1	13,8	1,3	-6
295	1,12	42	-2,86	Chute	0,9	1	14	0,1	-8
296	1,03	44	/	Droite	0,9	1	14	0,1	-6
297	1,11	38	-2,89	Chute	0,9	1	14	0,3	-8
298	1,02	41	/	Droite	0,9	1	14	0,3	-6
299	1,11	38	-2,89	Chute	0,9	1	14	0,5	-8
300	1,02	41	/	Droite	0,9	1	14	0,5	-6
301	1,11	38	-2,89	Chute	0,9	1	14	0,7	-8
302	1,02	41	/	Droite	0,9	1	14	0,7	-6
303	1,11	38	-2,89	Chute	0,9	1	14	0,9	-8
304	1,02	41	/	Droite	0,9	1	14	0,9	-6
305	1,11	38	-2,89	Chute	0,9	1	14	1,1	-8
306	1,02	41	/	Droite	0,9	1	14	1,1	-6
307	1,11	38	-2,89	Chute	0,9	1	14	1,3	-8
308	1,02	41	/	Droite	0,9	1	14	1,3	-6
309	1,06	50	-0,08	Chute	0,9	1	14,2	0,1	-8
310	1,06	50	/	Droite	0,9	1	14,2	0,1	-6
311	1,06	50	-0,08	Chute	0,9	1	14,2	0,3	-8
312	1,06	50	/	Droite	0,9	1	14,2	0,3	-6
313	1,06	50	-0,08	Chute	0,9	1	14,2	0,5	-8
314	1,06	50	/	Droite	0,9	1	14,2	0,5	-6
315	1,06	50	-0,08	Chute	0,9	1	14,2	0,7	-8
316	1,06	50	/	Droite	0,9	1	14,2	0,7	-6

Annexe 4

317	1,06	50	-0,08	Chute	0,9	1	14,2	0,9	-8
318	1,06	50	/	Droite	0,9	1	14,2	0,9	-6
319	1,06	50	-0,08	Chute	0,9	1	14,2	1,1	-8
320	1,06	50	/	Droite	0,9	1	14,2	1,1	-6
321	1,06	50	-0,08	Chute	0,9	1	14,2	1,3	-8
322	1,06	50	/	Droite	0,9	1	14,2	1,3	-6
323	1,06	51	2,76	Chute	0,9	1	14,4	0,1	-8
324	1,06	51	/	Droite	0,9	1	14,4	0,1	-6
325	1,06	51	2,76	Chute	0,9	1	14,4	0,3	-8
326	1,06	51	/	Droite	0,9	1	14,4	0,3	-6
327	1,06	51	2,76	Chute	0,9	1	14,4	0,5	-8
328	1,06	51	/	Droite	0,9	1	14,4	0,5	-6
329	1,06	51	2,76	Chute	0,9	1	14,4	0,7	-8
330	1,06	51	/	Droite	0,9	1	14,4	0,7	-6
331	1,06	51	2,76	Chute	0,9	1	14,4	0,9	-8
332	1,06	51	/	Droite	0,9	1	14,4	0,9	-6
333	1,06	51	2,76	Chute	0,9	1	14,4	1,1	-8
334	1,06	51	/	Droite	0,9	1	14,4	1,1	-6
335	1,06	51	2,76	Chute	0,9	1	14,4	1,3	-8
336	1,06	51	/	Droite	0,9	1	14,4	1,3	-6
337	1,17	38	-15,07	Chute	1	1	13	0,1	-8
338	0,67	41	/	Gauche	1	1	13	0,1	-6
339	1,02	17	-15,13	Chute	1	1	13	0,3	-8
340	1,47	37	9,98	Chute	1	1	13	0,3	-6
341	0,24	10	-15,76	Chute	1	1	13	0,5	-8
342	2,45	32	5,36	Chute	1	1	13	0,5	-6
343	2,56	3	-14,49	Chute	1	1	13	0,7	-8
344	3,17	26	0,42	Chute	1	1	13	0,7	-6
345	3,48	-3	-12,7	Chute	1	1	13	0,9	-8
346	2,93	14	-2,3	Chute	1	1	13	0,9	-6
347	3,72	-3	-12,1	Chute	1	1	13	1,1	-8
348	3,1	10	-2,23	Chute	1	1	13	1,1	-6
349	4,89	-2	-10,85	Chute	1	1	13	1,3	-8
350	3,3	8	-1,89	Chute	1	1	13	1,3	-6
351	1,07	39	-12,7	Chute	1	1	13,2	0,1	-8
352	0,56	41	/	Gauche	1	1	13,2	0,1	-6
353	0,15	19	-13,07	Chute	1	1	13,2	0,3	-8
354	1,23	37	10,42	Chute	1	1	13,2	0,3	-6
355	0,85	3	-13,06	Chute	1	1	13,2	0,5	-8
356	1,96	33	5,54	Chute	1	1	13,2	0,5	-6
357	1,68	-1	-13,03	Chute	1	1	13,2	0,7	-8
358	2,29	26	0,73	Chute	1	1	13,2	0,7	-6

Annexe 4

359	1,89	-3	-12,31	Chute	1	1	13,2	0,9	-8
360	2,48	20	-0,42	Chute	1	1	13,2	0,9	-6
361	1,97	-1	-11,43	Chute	1	1	13,2	1,1	-8
362	2,54	15	-0,6	Chute	1	1	13,2	1,1	-6
363	2,97	2	-10,25	Chute	1	1	13,2	1,3	-8
364	2,55	11	-1,02	Chute	1	1	13,2	1,3	-6
365	0,7	33	-10,43	Chute	1	1	13,4	0,1	-8
366	0,41	42	/	Gauche	1	1	13,4	0,1	-6
367	0,9	23	-10,75	Chute	1	1	13,4	0,3	-8
368	0,93	37	11,02	Chute	1	1	13,4	0,3	-6
369	1,33	20	-10,66	Chute	1	1	13,4	0,5	-8
370	1,35	33	6,84	Chute	1	1	13,4	0,5	-6
371	1,34	19	-10,66	Chute	1	1	13,4	0,7	-8
372	1,56	29	4,62	Chute	1	1	13,4	0,7	-6
373	1,1	15	-10,74	Chute	1	1	13,4	0,9	-8
374	1,63	26	3,48	Chute	1	1	13,4	0,9	-6
375	0,7	7	-11,24	Chute	1	1	13,4	1,1	-8
376	1,64	23	2,67	Chute	1	1	13,4	1,1	-6
377	0,75	1	-10,38	Chute	1	1	13,4	1,3	-8
378	1,64	23	2,3	Chute	1	1	13,4	1,3	-6
379	0,81	32	-8	Chute	1	1	13,6	0,1	-8
380	0,21	43	/	Gauche	1	1	13,6	0,1	-6
381	1,13	26	-7,93	Chute	1	1	13,6	0,3	-8
382	0,51	38	12,78	Chute	1	1	13,6	0,3	-6
383	1,12	24	-7,89	Chute	1	1	13,6	0,5	-8
384	0,64	34	9,21	Chute	1	1	13,6	0,5	-6
385	1,12	21	-7,87	Chute	1	1	13,6	0,7	-8
386	0,67	30	7,1	Chute	1	1	13,6	0,7	-6
387	1,12	20	-7,89	Chute	1	1	13,6	0,9	-8
388	0,67	29	5,78	Chute	1	1	13,6	0,9	-6
389	1,12	20	-7,89	Chute	1	1	13,6	1,1	-8
390	0,67	29	4,88	Chute	1	1	13,6	1,1	-6
391	1,12	20	-7,89	Chute	1	1	13,6	1,3	-8
392	0,67	29	4,52	Chute	1	1	13,6	1,3	-6
393	0,54	36	-5,31	Chute	1	1	13,8	0,1	-8
394	0,01	43	/	Gauche	1	1	13,8	0,1	-6
395	0,58	32	-5,3	Chute	1	1	13,8	0,3	-8
396	0,08	39	/	Gauche	1	1	13,8	0,3	-6
397	0,57	31	-5,3	Chute	1	1	13,8	0,5	-8
398	0,09	35	12,1	Chute	1	1	13,8	0,5	-6
399	0,57	31	-5,3	Chute	1	1	13,8	0,7	-8
400	0,09	35	9,89	Chute	1	1	13,8	0,7	-6
401	0,57	31	-5,3	Chute	1	1	13,8	0,9	-8

Annexe 4

402	0,09	35	8,39	Chute	1	1	13,8	0,9	-6
403	0,57	31	-5,3	Chute	1	1	13,8	1,1	-8
404	0,09	35	7,54	Chute	1	1	13,8	1,1	-6
405	0,57	31	-5,3	Chute	1	1	13,8	1,3	-8
406	0,09	35	7,06	Chute	1	1	13,8	1,3	-6
407	0,21	42	-2,59	Chute	1	1	14	0,1	-8
408	0,13	44	/	Droite	1	1	14	0,1	-6
409	0,2	39	-2,6	Chute	1	1	14	0,3	-8
410	0,13	41	/	Droite	1	1	14	0,3	-6
411	0,2	39	-2,6	Chute	1	1	14	0,5	-8
412	0,13	41	/	Droite	1	1	14	0,5	-6
413	0,2	39	-2,6	Chute	1	1	14	0,7	-8
414	0,13	41	/	Droite	1	1	14	0,7	-6
415	0,2	39	-2,6	Chute	1	1	14	0,9	-8
416	0,13	41	11,37	Chute	1	1	14	0,9	-6
417	0,2	39	-2,6	Chute	1	1	14	1,1	-8
418	0,13	41	10,43	Chute	1	1	14	1,1	-6
419	0,2	39	-2,6	Chute	1	1	14	1,3	-8
420	0,13	41	9,88	Chute	1	1	14	1,3	-6
421	0,15	51	0,25	Chute	1	1	14,2	0,1	-8
422	0,15	51	/	Droite	1	1	14,2	0,1	-6
423	0,15	51	0,25	Chute	1	1	14,2	0,3	-8
424	0,15	51	/	Droite	1	1	14,2	0,3	-6
425	0,15	51	0,25	Chute	1	1	14,2	0,5	-8
426	0,15	51	/	Droite	1	1	14,2	0,5	-6
427	0,15	51	0,25	Chute	1	1	14,2	0,7	-8
428	0,15	51	/	Droite	1	1	14,2	0,7	-6
429	0,15	51	0,25	Chute	1	1	14,2	0,9	-8
430	0,15	51	/	Droite	1	1	14,2	0,9	-6
431	0,15	51	0,25	Chute	1	1	14,2	1,1	-8
432	0,15	51	/	Droite	1	1	14,2	1,1	-6
433	0,15	51	0,25	Chute	1	1	14,2	1,3	-8
434	0,15	51	12,9	Chute	1	1	14,2	1,3	-6
435	0,15	51	3,11	Chute	1	1	14,4	0,1	-8
436	0,15	51	/	Droite	1	1	14,4	0,1	-6
437	0,15	51	3,11	Chute	1	1	14,4	0,3	-8
438	0,15	51	/	Droite	1	1	14,4	0,3	-6
439	0,15	51	3,11	Chute	1	1	14,4	0,5	-8
440	0,15	51	/	Droite	1	1	14,4	0,5	-6
441	0,15	51	3,11	Chute	1	1	14,4	0,7	-8
442	0,15	51	/	Droite	1	1	14,4	0,7	-6
443	0,15	51	3,11	Chute	1	1	14,4	0,9	-8

Annexe 4

444	0,15	51	/	Droite	1	1	14,4	0,9	-6
445	0,15	51	3,11	Chute	1	1	14,4	1,1	-8
446	0,15	51	/	Droite	1	1	14,4	1,1	-6
447	0,15	51	3,11	Chute	1	1	14,4	1,3	-8
448	0,15	51	/	Droite	1	1	14,4	1,3	-6
449	1,93	38	-14,53	Chute	1,1	1	13	0,1	-8
450	1,48	41	11,03	Chute	1,1	1	13	0,1	-6
451	2,02	19	-14,45	Chute	1,1	1	13	0,3	-8
452	2,28	37	6,7	Chute	1,1	1	13	0,3	-6
453	1,25	-3	-14,17	Chute	1,1	1	13	0,5	-8
454	3,11	31	1,92	Chute	1,1	1	13	0,5	-6
455	2,63	5	-12,82	Chute	1,1	1	13	0,7	-8
456	2,93	18	-2,56	Chute	1,1	1	13	0,7	-6
457	2,73	0	-12,92	Chute	1,1	1	13	0,9	-8
458	3,28	16	-2,61	Chute	1,1	1	13	0,9	-6
459	4,02	3	-11,41	Chute	1,1	1	13	1,1	-8
460	3,55	13	-2,74	Chute	1,1	1	13	1,1	-6
461	4,94	4	-10,48	Chute	1,1	1	13	1,3	-8
462	3,59	12	-2,7	Chute	1,1	1	13	1,3	-6
463	1,92	38	-12,11	Chute	1,1	1	13,2	0,1	-8
464	1,38	41	11,53	Chute	1,1	1	13,2	0,1	-6
465	0,54	20	-12,8	Chute	1,1	1	13,2	0,3	-8
466	2,04	37	6,8	Chute	1,1	1	13,2	0,3	-6
467	0,37	4	-13,01	Chute	1,1	1	13,2	0,5	-8
468	2,39	29	0,61	Chute	1,1	1	13,2	0,5	-6
469	0,14	5	-13,09	Chute	1,1	1	13,2	0,7	-8
470	2,39	20	-1,58	Chute	1,1	1	13,2	0,7	-6
471	1,01	0	-12,09	Chute	1,1	1	13,2	0,9	-8
472	2,42	18	-1,94	Chute	1,1	1	13,2	0,9	-6
473	1,84	2	-11,12	Chute	1,1	1	13,2	1,1	-8
474	2,45	16	-1,94	Chute	1,1	1	13,2	1,1	-6
475	2,77	2	-10,19	Chute	1,1	1	13,2	1,3	-8
476	2,45	15	-1,94	Chute	1,1	1	13,2	1,3	-6
477	1,05	32	-10,25	Chute	1,1	1	13,4	0,1	-8
478	1,22	42	12,34	Chute	1,1	1	13,4	0,1	-6
479	0,28	23	-10,48	Chute	1,1	1	13,4	0,3	-8
480	1,71	37	6,99	Chute	1,1	1	13,4	0,3	-6
481	0,66	20	-10,48	Chute	1,1	1	13,4	0,5	-8
482	1,92	31	2,03	Chute	1,1	1	13,4	0,5	-6
483	0,66	18	-10,46	Chute	1,1	1	13,4	0,7	-8
484	2	27	1,09	Chute	1,1	1	13,4	0,7	-6
485	0,43	14	-10,49	Chute	1,1	1	13,4	0,9	-8
486	2,03	24	0,79	Chute	1,1	1	13,4	0,9	-6

Annexe 4

487	0,09	2	-10,46	Chute	1,1	1	13,4	1,1	-8
488	2,03	23	0,73	Chute	1,1	1	13,4	1,1	-6
489	0,4	1	-10,06	Chute	1,1	1	13,4	1,3	-8
490	2,03	23	0,73	Chute	1,1	1	13,4	1,3	-6
491	0,18	31	-7,82	Chute	1,1	1	13,6	0,1	-8
492	1,01	42	13,8	Chute	1,1	1	13,6	0,1	-6
493	0,45	27	-7,79	Chute	1,1	1	13,6	0,3	-8
494	1,28	38	9	Chute	1,1	1	13,6	0,3	-6
495	0,41	25	-7,79	Chute	1,1	1	13,6	0,5	-8
496	1,37	34	6,71	Chute	1,1	1	13,6	0,5	-6
497	0,39	22	-7,8	Chute	1,1	1	13,6	0,7	-8
498	1,39	31	5,41	Chute	1,1	1	13,6	0,7	-6
499	0,39	21	-7,81	Chute	1,1	1	13,6	0,9	-8
500	1,39	31	4,54	Chute	1,1	1	13,6	0,9	-6
501	0,39	21	-7,81	Chute	1,1	1	13,6	1,1	-8
502	1,39	31	4,14	Chute	1,1	1	13,6	1,1	-6
503	0,39	21	-7,81	Chute	1,1	1	13,6	1,3	-8
504	1,39	31	4,03	Chute	1,1	1	13,6	1,3	-6
505	0,25	37	-5,13	Chute	1,1	1	13,8	0,1	-8
506	0,8	43	15,89	Chute	1,1	1	13,8	0,1	-6
507	0,22	32	-5,14	Chute	1,1	1	13,8	0,3	-8
508	0,86	39	11,39	Chute	1,1	1	13,8	0,3	-6
509	0,22	31	-5,12	Chute	1,1	1	13,8	0,5	-8
510	0,86	36	9,13	Chute	1,1	1	13,8	0,5	-6
511	0,22	31	-5,12	Chute	1,1	1	13,8	0,7	-8
512	0,86	36	7,77	Chute	1,1	1	13,8	0,7	-6
513	0,22	31	-5,12	Chute	1,1	1	13,8	0,9	-8
514	0,86	36	6,94	Chute	1,1	1	13,8	0,9	-6
515	0,22	31	-5,12	Chute	1,1	1	13,8	1,1	-8
516	0,86	36	6,53	Chute	1,1	1	13,8	1,1	-6
517	0,22	31	-5,12	Chute	1,1	1	13,8	1,3	-8
518	0,86	36	6,42	Chute	1,1	1	13,8	1,3	-6
519	0,61	43	-2,29	Chute	1,1	1	14	0,1	-8
520	0,67	44	/	Gauche	1,1	1	14	0,1	-6
521	0,62	40	-2,27	Chute	1,1	1	14	0,3	-8
522	0,67	42	13,94	Chute	1,1	1	14	0,3	-6
523	0,62	40	-2,27	Chute	1,1	1	14	0,5	-8
524	0,67	42	11,63	Chute	1,1	1	14	0,5	-6
525	0,62	40	-2,27	Chute	1,1	1	14	0,7	-8
526	0,67	42	10,35	Chute	1,1	1	14	0,7	-6
527	0,62	40	-2,27	Chute	1,1	1	14	0,9	-8
528	0,67	42	9,47	Chute	1,1	1	14	0,9	-6
529	0,62	40	-2,27	Chute	1,1	1	14	1,1	-8

Annexe 4

530	0,67	42	9,08	Chute	1,1	1	14	1,1	-6
531	0,62	40	-2,27	Chute	1,1	1	14	1,3	-8
532	0,67	42	8,99	Chute	1,1	1	14	1,3	-6
533	0,65	51	0,58	Chute	1,1	1	14,2	0,1	-8
534	0,65	51	/	Gauche	1,1	1	14,2	0,1	-6
535	0,65	51	0,58	Chute	1,1	1	14,2	0,3	-8
536	0,65	51	/	Gauche	1,1	1	14,2	0,3	-6
537	0,65	51	0,58	Chute	1,1	1	14,2	0,5	-8
538	0,65	51	14,59	Chute	1,1	1	14,2	0,5	-6
539	0,65	51	0,58	Chute	1,1	1	14,2	0,7	-8
540	0,65	51	13,3	Chute	1,1	1	14,2	0,7	-6
541	0,65	51	0,58	Chute	1,1	1	14,2	0,9	-8
542	0,65	51	12,37	Chute	1,1	1	14,2	0,9	-6
543	0,65	51	0,58	Chute	1,1	1	14,2	1,1	-8
544	0,65	51	11,93	Chute	1,1	1	14,2	1,1	-6
545	0,65	51	0,58	Chute	1,1	1	14,2	1,3	-8
546	0,65	51	11,81	Chute	1,1	1	14,2	1,3	-6
547	0,65	51	3,44	Chute	1,1	1	14,4	0,1	-8
548	0,65	51	/	Gauche	1,1	1	14,4	0,1	-6
549	0,65	51	3,44	Chute	1,1	1	14,4	0,3	-8
550	0,65	51	/	Gauche	1,1	1	14,4	0,3	-6
551	0,65	51	3,44	Chute	1,1	1	14,4	0,5	-8
552	0,65	51	/	Gauche	1,1	1	14,4	0,5	-6
553	0,65	51	3,44	Chute	1,1	1	14,4	0,7	-8
554	0,65	51	15,34	Chute	1,1	1	14,4	0,7	-6
555	0,65	51	3,44	Chute	1,1	1	14,4	0,9	-8
556	0,65	51	14,63	Chute	1,1	1	14,4	0,9	-6
557	0,65	51	3,44	Chute	1,1	1	14,4	1,1	-8
558	0,65	51	14,32	Chute	1,1	1	14,4	1,1	-6
559	0,65	51	3,44	Chute	1,1	1	14,4	1,3	-8
560	0,65	51	14,28	Chute	1,1	1	14,4	1,3	-6
561	2,59	38	-14,01	Chute	1,2	1	13	0,1	-8
562	2,2	40	7,24	Chute	1,2	1	13	0,1	-6
563	2,72	22	-14,03	Chute	1,2	1	13	0,3	-8
564	2,88	35	2,46	Chute	1,2	1	13	0,3	-6
565	1,36	1	-14,34	Chute	1,2	1	13	0,5	-8
566	3,11	24	-1,76	Chute	1,2	1	13	0,5	-6
567	2,91	2	-12,38	Chute	1,2	1	13	0,7	-8
568	3,21	20	-3,09	Chute	1,2	1	13	0,7	-6
569	2,93	1	-12,36	Chute	1,2	1	13	0,9	-8
570	3,66	16	-3,1	Chute	1,2	1	13	0,9	-6
571	3,89	1	-11,41	Chute	1,2	1	13	1,1	-8

Annexe 4

572	3,8	15	-2,99	Chute	1,2	1	13	1,1	-6
573	4,77	2	-10,53	Chute	1,2	1	13	1,3	-8
574	3,81	14	-2,97	Chute	1,2	1	13	1,3	-6
575	2,54	37	-11,62	Chute	1,2	1	13,2	0,1	-8
576	2,11	41	7,59	Chute	1,2	1	13,2	0,1	-6
577	0,9	21	-12,59	Chute	1,2	1	13,2	0,3	-8
578	2,55	34	1,43	Chute	1,2	1	13,2	0,3	-6
579	0,14	4	-12,8	Chute	1,2	1	13,2	0,5	-8
580	2,51	25	-2,08	Chute	1,2	1	13,2	0,5	-6
581	0,04	-2	-12,78	Chute	1,2	1	13,2	0,7	-8
582	2,59	21	-2,74	Chute	1,2	1	13,2	0,7	-6
583	0,56	-4	-12,29	Chute	1,2	1	13,2	0,9	-8
584	2,68	18	-3,83	Chute	1,2	1	13,2	0,9	-6
585	1,53	0	-11,35	Chute	1,2	1	13,2	1,1	-8
586	2,68	18	-3,83	Chute	1,2	1	13,2	1,1	-6
587	2,61	2	-10,23	Chute	1,2	1	13,2	1,3	-8
588	2,69	16	-3,83	Chute	1,2	1	13,2	1,3	-6
589	0,94	28	-10,15	Chute	1,2	1	13,4	0,1	-8
590	1,95	41	8,1	Chute	1,2	1	13,4	0,1	-6
591	0,25	23	-10,24	Chute	1,2	1	13,4	0,3	-8
592	2,2	35	1,44	Chute	1,2	1	13,4	0,3	-6
593	0	21	-10,29	Chute	1,2	1	13,4	0,5	-8
594	2,25	27	-0,81	Chute	1,2	1	13,4	0,5	-6
595	0,02	19	-10,28	Chute	1,2	1	13,4	0,7	-8
596	2,25	24	-1,47	Chute	1,2	1	13,4	0,7	-6
597	0,21	15	-10,24	Chute	1,2	1	13,4	0,9	-8
598	2,25	23	-1,28	Chute	1,2	1	13,4	0,9	-6
599	0,21	6	-10,49	Chute	1,2	1	13,4	1,1	-8
600	2,25	22	-1,28	Chute	1,2	1	13,4	1,1	-6
601	0,14	1	-10,15	Chute	1,2	1	13,4	1,3	-8
602	2,25	22	-1,28	Chute	1,2	1	13,4	1,3	-6
603	0,42	32	-7,65	Chute	1,2	1	13,6	0,1	-8
604	1,73	42	9,27	Chute	1,2	1	13,6	0,1	-6
605	0,25	26	-7,68	Chute	1,2	1	13,6	0,3	-8
606	1,9	37	3,91	Chute	1,2	1	13,6	0,3	-6
607	0,27	25	-7,68	Chute	1,2	1	13,6	0,5	-8
608	1,96	33	2,72	Chute	1,2	1	13,6	0,5	-6
609	0,31	23	-7,66	Chute	1,2	1	13,6	0,7	-8
610	1,96	31	2,33	Chute	1,2	1	13,6	0,7	-6
611	0,31	22	-7,66	Chute	1,2	1	13,6	0,9	-8
612	1,96	31	2,22	Chute	1,2	1	13,6	0,9	-6
613	0,31	22	-7,66	Chute	1,2	1	13,6	1,1	-8
614	1,96	31	2,22	Chute	1,2	1	13,6	1,1	-6

Annexe 4

615	0,31	22	-7,66	Chute	1,2	1	13,6	1,3	-8
616	1,96	31	2,22	Chute	1,2	1	13,6	1,3	-6
617	0,98	37	-4,91	Chute	1,2	1	13,8	0,1	-8
618	1,52	43	11,73	Chute	1,2	1	13,8	0,1	-6
619	0,96	32	-4,91	Chute	1,2	1	13,8	0,3	-8
620	1,57	39	8,69	Chute	1,2	1	13,8	0,3	-6
621	0,97	32	-4,91	Chute	1,2	1	13,8	0,5	-8
622	1,57	37	7,17	Chute	1,2	1	13,8	0,5	-6
623	0,97	32	-4,91	Chute	1,2	1	13,8	0,7	-8
624	1,57	37	6,33	Chute	1,2	1	13,8	0,7	-6
625	0,97	32	-4,91	Chute	1,2	1	13,8	0,9	-8
626	1,57	37	5,9	Chute	1,2	1	13,8	0,9	-6
627	0,97	32	-4,91	Chute	1,2	1	13,8	1,1	-8
628	1,57	37	5,77	Chute	1,2	1	13,8	1,1	-6
629	0,97	32	-4,91	Chute	1,2	1	13,8	1,3	-8
630	1,57	37	5,78	Chute	1,2	1	13,8	1,3	-6
631	1,37	43	-1,94	Chute	1,2	1	14	0,1	-8
632	1,41	45	13,66	Chute	1,2	1	14	0,1	-6
633	1,37	41	-1,93	Chute	1,2	1	14	0,3	-8
634	1,41	43	10,6	Chute	1,2	1	14	0,3	-6
635	1,37	41	-1,93	Chute	1,2	1	14	0,5	-8
636	1,41	43	9,26	Chute	1,2	1	14	0,5	-6
637	1,37	41	-1,93	Chute	1,2	1	14	0,7	-8
638	1,41	43	8,54	Chute	1,2	1	14	0,7	-6
639	1,37	41	-1,93	Chute	1,2	1	14	0,9	-8
640	1,41	43	8,19	Chute	1,2	1	14	0,9	-6
641	1,37	41	-1,93	Chute	1,2	1	14	1,1	-8
642	1,41	43	8,13	Chute	1,2	1	14	1,1	-6
643	1,37	41	-1,93	Chute	1,2	1	14	1,3	-8
644	1,41	43	8,13	Chute	1,2	1	14	1,3	-6
645	1,4	51	0,96	Chute	1,2	1	14,2	0,1	-8
646	1,4	51	15,41	Chute	1,2	1	14,2	0,1	-6
647	1,4	51	0,96	Chute	1,2	1	14,2	0,3	-8
648	1,4	51	12,61	Chute	1,2	1	14,2	0,3	-6
649	1,4	51	0,96	Chute	1,2	1	14,2	0,5	-8
650	1,4	51	11,46	Chute	1,2	1	14,2	0,5	-6
651	1,4	51	0,96	Chute	1,2	1	14,2	0,7	-8
652	1,4	51	10,89	Chute	1,2	1	14,2	0,7	-6
653	1,4	51	0,96	Chute	1,2	1	14,2	0,9	-8
654	1,4	51	10,63	Chute	1,2	1	14,2	0,9	-6
655	1,4	51	0,96	Chute	1,2	1	14,2	1,1	-8
656	1,4	51	10,6	Chute	1,2	1	14,2	1,1	-6
657	1,4	51	0,96	Chute	1,2	1	14,2	1,3	-8

Annexe 4

658	1,4	51	10,6	Chute	1,2	1	14,2	1,3	-6
659	1,4	51	3,81	Chute	1,2	1	14,4	0,1	-8
660	1,4	51	16,43	Chute	1,2	1	14,4	0,1	-6
661	1,4	51	3,81	Chute	1,2	1	14,4	0,3	-8
662	1,4	51	14,36	Chute	1,2	1	14,4	0,3	-6
663	1,4	51	3,81	Chute	1,2	1	14,4	0,5	-8
664	1,4	51	13,42	Chute	1,2	1	14,4	0,5	-6
665	1,4	51	3,81	Chute	1,2	1	14,4	0,7	-8
666	1,4	51	12,95	Chute	1,2	1	14,4	0,7	-6
667	1,4	51	3,81	Chute	1,2	1	14,4	0,9	-8
668	1,4	51	12,76	Chute	1,2	1	14,4	0,9	-6
669	1,4	51	3,81	Chute	1,2	1	14,4	1,1	-8
670	1,4	51	12,77	Chute	1,2	1	14,4	1,1	-6
671	1,4	51	3,81	Chute	1,2	1	14,4	1,3	-8
672	1,4	51	12,77	Chute	1,2	1	14,4	1,3	-6
673	3,1	33	-13,87	Chute	1,3	1	13	0,1	-8
674	2,28	32	-3,91	Chute	1,3	1	13	0,1	-6
675	3,25	23	-13,6	Chute	1,3	1	13	0,3	-8
676	2,36	28	-4,5	Chute	1,3	1	13	0,3	-6
677	2,22	5	-14,07	Chute	1,3	1	13	0,5	-8
678	2,56	23	-5,09	Chute	1,3	1	13	0,5	-6
679	2,8	0	-12,53	Chute	1,3	1	13	0,7	-8
680	3,07	19	-4,71	Chute	1,3	1	13	0,7	-6
681	2,61	-2	-12,64	Chute	1,3	1	13	0,9	-8
682	3,6	16	-4,12	Chute	1,3	1	13	0,9	-6
683	3,87	1	-11,46	Chute	1,3	1	13	1,1	-8
684	3,67	15	-4,01	Chute	1,3	1	13	1,1	-6
685	4,76	2	-10,56	Chute	1,3	1	13	1,3	-8
686	3,71	14	-3,92	Chute	1,3	1	13	1,3	-6
687	2,17	33	-12,23	Chute	1,3	1	13,2	0,1	-8
688	2,16	35	-3,39	Chute	1,3	1	13,2	0,1	-6
689	2,15	23	-12,22	Chute	1,3	1	13,2	0,3	-8
690	2,22	30	-4,41	Chute	1,3	1	13,2	0,3	-6
691	1,81	18	-12,09	Chute	1,3	1	13,2	0,5	-8
692	2,33	24	-4,72	Chute	1,3	1	13,2	0,5	-6
693	1,53	6	-12,1	Chute	1,3	1	13,2	0,7	-8
694	2,61	20	-4,37	Chute	1,3	1	13,2	0,7	-6
695	1,5	3	-12,1	Chute	1,3	1	13,2	0,9	-8
696	2,67	20	-4,26	Chute	1,3	1	13,2	0,9	-6
697	2,22	5	-11,14	Chute	1,3	1	13,2	1,1	-8
698	2,71	19	-4,2	Chute	1,3	1	13,2	1,1	-6
699	2,78	6	-10,42	Chute	1,3	1	13,2	1,3	-8
700	2,72	17	-4,17	Chute	1,3	1	13,2	1,3	-6

Annexe 4

701	1,83	31	-9,93	Chute	1,3	1	13,4	0,1	-8
702	2,12	36	-3,15	Chute	1,3	1	13,4	0,1	-6
703	1,01	24	-10,05	Chute	1,3	1	13,4	0,3	-8
704	2,15	30	-4,02	Chute	1,3	1	13,4	0,3	-6
705	0,72	19	-10,2	Chute	1,3	1	13,4	0,5	-8
706	2,24	25	-4,12	Chute	1,3	1	13,4	0,5	-6
707	0,68	18	-10,23	Chute	1,3	1	13,4	0,7	-8
708	2,24	24	-4,11	Chute	1,3	1	13,4	0,7	-6
709	0,85	15	-10,15	Chute	1,3	1	13,4	0,9	-8
710	2,25	23	-4,1	Chute	1,3	1	13,4	0,9	-6
711	1,04	10	-9,96	Chute	1,3	1	13,4	1,1	-8
712	2,25	22	-4,08	Chute	1,3	1	13,4	1,1	-6
713	0,52	4	-10,67	Chute	1,3	1	13,4	1,3	-8
714	2,25	22	-4,08	Chute	1,3	1	13,4	1,3	-6
715	0,92	32	-7,61	Chute	1,3	1	13,6	0,1	-8
716	2,04	37	-2,55	Chute	1,3	1	13,6	0,1	-6
717	0,84	26	-7,67	Chute	1,3	1	13,6	0,3	-8
718	2,11	32	-3,04	Chute	1,3	1	13,6	0,3	-6
719	0,85	25	-7,67	Chute	1,3	1	13,6	0,5	-8
720	2,12	29	-3,15	Chute	1,3	1	13,6	0,5	-6
721	0,88	24	-7,64	Chute	1,3	1	13,6	0,7	-8
722	2,12	29	-3,15	Chute	1,3	1	13,6	0,7	-6
723	0,89	23	-7,61	Chute	1,3	1	13,6	0,9	-8
724	2,12	29	-3,15	Chute	1,3	1	13,6	0,9	-6
725	0,89	23	-7,61	Chute	1,3	1	13,6	1,1	-8
726	2,12	29	-3,15	Chute	1,3	1	13,6	1,1	-6
727	0,89	23	-7,61	Chute	1,3	1	13,6	1,3	-8
728	2,12	29	-3,15	Chute	1,3	1	13,6	1,3	-6
729	1,43	36	-4,81	Chute	1,3	1	13,8	0,1	-8
730	1,97	41	-1,45	Chute	1,3	1	13,8	0,1	-6
731	1,41	33	-4,85	Chute	1,3	1	13,8	0,3	-8
732	2	37	-1,36	Chute	1,3	1	13,8	0,3	-6
733	1,42	32	-4,85	Chute	1,3	1	13,8	0,5	-8
734	2	37	-1,34	Chute	1,3	1	13,8	0,5	-6
735	1,42	32	-4,85	Chute	1,3	1	13,8	0,7	-8
736	2	37	-1,34	Chute	1,3	1	13,8	0,7	-6
737	1,42	32	-4,85	Chute	1,3	1	13,8	0,9	-8
738	2	37	-1,34	Chute	1,3	1	13,8	0,9	-6
739	1,42	32	-4,85	Chute	1,3	1	13,8	1,1	-8
740	2	37	-1,34	Chute	1,3	1	13,8	1,1	-6
741	1,42	32	-4,85	Chute	1,3	1	13,8	1,3	-8
742	2	37	-1,34	Chute	1,3	1	13,8	1,3	-6
743	1,84	43	-1,78	Chute	1,3	1	14	0,1	-8

Annexe 4

744	1,87	43	4,22	Chute	1,3	1	14	0,1	-6
745	1,84	42	-1,77	Chute	1,3	1	14	0,3	-8
746	1,87	42	3,64	Chute	1,3	1	14	0,3	-6
747	1,84	42	-1,77	Chute	1,3	1	14	0,5	-8
748	1,87	42	3,58	Chute	1,3	1	14	0,5	-6
749	1,84	42	-1,77	Chute	1,3	1	14	0,7	-8
750	1,87	42	3,58	Chute	1,3	1	14	0,7	-6
751	1,84	42	-1,77	Chute	1,3	1	14	0,9	-8
752	1,87	42	3,58	Chute	1,3	1	14	0,9	-6
753	1,84	42	-1,77	Chute	1,3	1	14	1,1	-8
754	1,87	42	3,58	Chute	1,3	1	14	1,1	-6
755	1,84	42	-1,77	Chute	1,3	1	14	1,3	-8
756	1,87	42	3,58	Chute	1,3	1	14	1,3	-6
757	1,86	49	1,08	Chute	1,3	1	14,2	0,1	-8
758	1,86	49	2,77	Chute	1,3	1	14,2	0,1	-6
759	1,86	49	1,08	Chute	1,3	1	14,2	0,3	-8
760	1,86	49	2,83	Chute	1,3	1	14,2	0,3	-6
761	1,86	49	1,08	Chute	1,3	1	14,2	0,5	-8
762	1,86	49	2,83	Chute	1,3	1	14,2	0,5	-6
763	1,86	49	1,08	Chute	1,3	1	14,2	0,7	-8
764	1,86	49	2,83	Chute	1,3	1	14,2	0,7	-6
765	1,86	49	1,08	Chute	1,3	1	14,2	0,9	-8
766	1,86	49	2,83	Chute	1,3	1	14,2	0,9	-6
767	1,86	49	1,08	Chute	1,3	1	14,2	1,1	-8
768	1,86	49	2,83	Chute	1,3	1	14,2	1,1	-6
769	1,86	49	1,08	Chute	1,3	1	14,2	1,3	-8
770	1,86	49	2,83	Chute	1,3	1	14,2	1,3	-6
771	1,86	49	2,39	Chute	1,3	1	14,4	0,1	-8
772	1,86	49	2,39	Chute	1,3	1	14,4	0,1	-6
773	1,86	49	2,39	Chute	1,3	1	14,4	0,3	-8
774	1,86	49	2,39	Chute	1,3	1	14,4	0,3	-6
775	1,86	49	2,39	Chute	1,3	1	14,4	0,5	-8
776	1,86	49	2,39	Chute	1,3	1	14,4	0,5	-6
777	1,86	49	2,39	Chute	1,3	1	14,4	0,7	-8
778	1,86	49	2,39	Chute	1,3	1	14,4	0,7	-6
779	1,86	49	2,39	Chute	1,3	1	14,4	0,9	-8
780	1,86	49	2,39	Chute	1,3	1	14,4	0,9	-6
781	1,86	49	2,39	Chute	1,3	1	14,4	1,1	-8
782	1,86	49	2,39	Chute	1,3	1	14,4	1,1	-6
783	1,86	49	2,39	Chute	1,3	1	14,4	1,3	-8
784	1,86	49	2,39	Chute	1,3	1	14,4	1,3	-6

Ecart_choc >2m

Ecart_chute < -2m

Ecart_chute > 2m

Tri visuel

Bibliographie

- [1] ONISR, “La sécurité routière en France. Bilan de l’accidentalité de l’année 2015,” *Sécurité routière | Tous responsables*. [Online]. Available: <http://www.securite-routiere.gouv.fr/la-securite-routiere/l-observatoire-national-interministeriel-de-la-securite-routiere/accidentalite-routiere/bilans-annuels>. [Accessed: 24-Oct-2016].
- [2] INRETS, *L’étude détaillée d’accidents orientée vers la sécurité primaire*. .
- [3] R. Byatt and R. Watts, *MANUAL OF ROAD ACCIDENT INVESTIGATIONS. VOLUME 2*. 1981.
- [4] R. W. Rivers, *Traffic accident investigators’ handbook*. Thomas Publisher, 1980.
- [5] S. Régnier, “Dynamique des Systèmes Multicorps.” 2008.
- [6] M. Gérardin, A. Cardona, D. B. Doan, and J. Duysens, “Finite Element Modeling Concepts in Multibody Dynamics,” in *Computer-Aided Analysis of Rigid and Flexible Mechanical Systems*, M. F. O. S. Pereira and J. A. C. Ambrósio, Eds. Springer Netherlands, 1994, pp. 233–284.
- [7] O. Verlinden, *Simulation du comportement dynamique de systemes multicorps flexibles comportant des membrures de forme complexe*. Faculte Polytechnique de Mons, Ph.-D.-Thesis, 1994.
- [8] A. A. Shabana, *Dynamics of Multibody Systems*. Cambridge University Press, 2003.
- [9] R. E. Roberson and R. Schwertassek, *Dynamics of multibody systems*, vol. 18. Springer-Verlag Berlin, 1988.
- [10] P. le Borzec and J. Lotterie, *Principes de la théorie des mécanismes*. Dunod, 1975.
- [11] E. J. Haug, *Computer aided kinematics and dynamics of mechanical systems*, vol. 1. Allyn and Bacon Boston, 1989.
- [12] J. G. de Jalon, J. Cuadrado, A. Avello, and J. M. Jimenez, “Kinematic and dynamic simulation of rigid and flexible systems with fully Cartesian coordinates,” in *Computer-Aided Analysis of Rigid and Flexible Mechanical Systems*, Springer, 1994, pp. 285–323.
- [13] Y. A. Papegay, “Outils Formels pour la Modélisation en Mécanique,” Université Nice Sophia Antipolis, 1992.
- [14] J. L. Dion, “Théorie et pratique des Logiciels de simulation des mécanismes ‘Systèmes multicorps.’” 2012.
- [15] J.-P. Mizzi, *La modélisation mécanique: utilisation de la géométrie différentielle et du calcul formel*. 1995.
- [16] T. Paustio, “Génération et Parallélisation des Équations du Mouvement de Systèmes Multicorps par l’Approche Symbolique.”
- [17] S. Maakaroun, P. Chevrel, M. Gautier, and W. Khalil, “Modelling and Simulation of a Two wheeled vehicle with suspensions by using Robotic Formalism,” *IFAC Proc. Vol.*, vol. 44, no. 1, pp. 2156–2161, Jan. 2011.
- [18] H. Pacejka, *Tire and Vehicle Dynamics*. Elsevier, 2005.
- [19] V. Cossalter, R. Lot, and M. Massaro, “An advanced multibody code for handling and stability analysis of motorcycles,” *Meccanica*, vol. 46, no. 5, pp. 943–958, 2011.
- [20] R. S. Sharp, S. Evangelou, and D. J. Limebeer, “Advances in the modelling of motorcycle dynamics,” *Multibody Syst. Dyn.*, vol. 12, no. 3, pp. 251–283, 2004.
- [21] E. J. H. de Vries and H. B. Pacejka, “Motorcycle Tyre Measurements and Models,” *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 29, no. sup1, pp. 280–298, Jan. 1998.
- [22] Y. Tezuka, H. Ishii, and S. Kiyota, “Application of the magic formula tire model to motorcycle maneuverability analysis,” *JSAE Rev.*, vol. 22, no. 3, pp. 305–310, Jul. 2001.
- [23] V. Cossalter, *Motorcycle dynamics*. Lulu. com, 2006.
- [24] R. Berrita and L. Mitolo, “Evaluation of motorcycle performance in ‘U’ turn test using multibody code LMs DADS,” *proceeding of HTCE*, Modena Italy, 2002.

- [25] P. Appell, "Traité de mécanique rationnelle," 1932. [Online]. Available: <http://tocs.ulb-tu-darmstadt.de/133791785.pdf>. [Accessed: 07-Mar-2017].
- [26] R. S. SHARP, "The Lateral Dynamics of Motorcycles and Bicycles," *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 14, no. 4–6, pp. 265–283, Jun. 1985.
- [27] M. Da Lio, V. Cossalter, R. Lot, and L. Fabbri, "The influence of tyre characteristics on motorcycle manoeuvrability," 1999.
- [28] R. S. Sharp, "The stability and control of motorcycles," *J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 13, no. 5, pp. 316–329, 1971.
- [29] V. Cossalter, A. Doria, and R. Lot, "Optimum Suspension Design for Motorcycle Braking," 2000. [Online]. Available: <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1076/vesd.34.3.175.2034>. [Accessed: 08-Dec-2016].
- [30] L. Seddiki, A. Rabhi, N. K. M'Sirdi, and Y. Delanne, "Analyse Comparative des Modèles de Contact Pneu Chaussée," 2006. [Online]. Available: <http://e-sta.see.asso.fr/IMG/pdf/09-eSTA-V10.pdf>. [Accessed: 08-Dec-2016].
- [31] C. Ott, B. Angrosch, J. Edelmann, and M. Plöchl, "Some Investigations on the Wobble Mode of a Bicycle," 2010. [Online]. Available: <http://www.bicycle.tudelft.nl/ProceedingsBMD2010/papers/ott2010investigations.pdf>. [Accessed: 08-Dec-2016].
- [32] B. Yannou, "Analyse fonctionnelle_analyse de la valeur.pdf." [Online]. Available: http://laviateur08.free.fr/ecole/CPI/M%E9ca/cours/analyse%20fonctionnelle/Analyse%20fonctionnelle_analyse%20de%20la%20valeur.pdf. [Accessed: 07-Mar-2017].
- [33] F. Audry, "La démarche d'analyse fonctionnelle.pdf," 2011. [Online]. Available: <http://194.2.121.60:8080/cartec.2/pages/Programme/La%20d%C3%A9marche%20d'analyse%20fonctionnelle.pdf>. [Accessed: 07-Mar-2017].
- [34] S. Evangelou, "The control and stability analysis of two-wheeled road vehicles," 2003.
- [35] T. Gibaud and A. Gibaud, "Etude de la période d'un pendule pesant: de la mécanique du point à la mécanique du solide." [Online]. Available: http://perso.ens-lyon.fr/thomas.gibaud/pdf/tg_pendulepesant.pdf. [Accessed: 07-Mar-2017].
- [36] V. Cossalter and R. Lot, "A Motorcycle Multi-Body Model for Real Time Simulations Based on the Natural Coordinates Approach," *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 37, no. 6, pp. 423–447, 2002.
- [37] MSC Software, "Adams, Real Dynamics for Functional Virtual Prototyping." [Online]. Available: http://d18lhfxtyyykhi.cloudfront.net/cdn/farfuture/1w7MLM_qew4TQxvxo4njFVxKzznJ24sqjXq_dSz7LMO/mtime:1378846112/sites/default/files/ds_adams_ltr_w.pdf. [Accessed: 15-Dec-2016].
- [38] R. C. Smith and E. J. Haug, "DADS - Dynamic Analysis and Design System," 1990. [Online]. Available: http://download.springer.com/static/pdf/498/chp%253A10.1007%252F978-3-642-50995-7_11.pdf?originUrl=http%3A%2F%2Flink.springer.com%2Fchapter%2F10.1007%2F978-3-642-50995-7_11&token2=exp=1481795074~acl=%2Fstatic%2Fpdf%2F498%2Fchp%25253A10.1007%25252F978-3-642-50995-7_11.pdf%3ForiginUrl%3Dhttp%253A%252F%252Flink.springer.com%252Fchapter%252F10.1007%252F978-3-642-50995-7_11*~hmac=6c4b64145f1abac44f6e6f54a45f73f8e87e1752133b267dcd4ee18ee8f2c2e6. [Accessed: 15-Dec-2016].
- [39] M. Otter, H. Elmqvist, and F. E. Cellier, "Modeling of multibody systems with the object-oriented modeling language Dymola," *Nonlinear Dyn.*, vol. 9, no. 1–2, pp. 91–112.
- [40] M. W. Sayers, "Autosim," 1993. [Online]. Available: <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/00423119308969467>. [Accessed: 15-Dec-2016].

-
- [41] G. D. Wood and D. C. Kennedy, "Simulating Mechanical Systems in Simulink with SimMechanics," 2003. [Online]. Available: https://www.mathworks.com/tagteam/12634_SimMechanics.pdf. [Accessed: 15-Dec-2016].
- [42] "Delft-Tyre - MF-tyre/MF-Swift," *TASS International*, 07-Jan-2013. [Online]. Available: <https://www.tassinternational.com/delft-tyre-mf-tyremf-swift>. [Accessed: 28-Nov-2016].
- [43] I. J. M. Besselink, "Vehicle dynamics analysis using SimMechanics and TNO Delft-Tyre."
- [44] D. Lechner and C. Naude, "Road Incident Analysis between Naturalistic Driving and Accident In-depth Investigation," *FAST-Zero11 First Int. Symp. Future Act. Saf. Technol. Zero-Traffic-Accid.*, 2011.
- [45] T. Serre, C. Naude, S. Chauvet, J. Y. Fournier, D. Lechner, and V. Ledoux, "Towards a classification of road incidents acquired from public fleets of vehicles," 2013.
- [46] *Arrêté du 10 janvier 2013 modifiant l'arrêté du 23 avril 2012 fixant les modalités pratiques de l'examen du permis de conduire des catégories A1, A2 et A.*
- [47] T. Serre, C. Masson, C. Perrin, J.-L. Martin, A. Moskal, and M. Llari, "The motorcyclist impact against a light vehicle: Epidemiological, accidentological and biomechanic analysis," *Accid. Anal. Prev.*, vol. 49, pp. 223–228, Nov. 2012.
- [48] C. Naude *et al.*, "Acquisition and analysis of road incidents based on vehicle dynamics," 2017.
- [49] F. Attal, "Classification de situations de conduite et détection des événements critiques d'un deux roues motorisé," 2016. [Online]. Available: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01271020/document>. [Accessed: 29-May-2017].
- [50] P. Subirats, "Cinématique des 2RM sur les carrefours giratoires." CEREMA, 2011.
- [51] N. C. Cerema, "Freinage d'urgence motos vs voitures particulières Essais sur piste." 2016.
- [52] D. Lechner, G. Malaterre, and D. Fleury, "La reconstitution cinématique des accidents." Rapport INRETS n°21 (réf 1853), 1986.