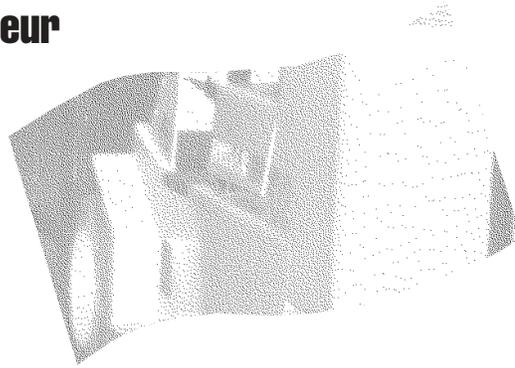


Modélisation d'un chariot élévateur et de son cariste pour améliorer la sécurité lors de renversements latéraux



Michel Gou
Carl-Éric Rubin
Maria Olteanu
René Benoît
Marina Koutchouk

Janvier 2003

R-322

RAPPORT





Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

NOS RECHERCHES *travaillent* pour vous !

MISSION

- ▶ Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes.
- ▶ Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.
- ▶ Assurer la diffusion des connaissances, jouer un rôle de référence scientifique et d'expert.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission de la santé et de la sécurité du travail.

POUR EN SAVOIR PLUS...

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour.
De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement.
www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CSST.
Abonnement : 1-817-221-7046

Dépôt légal
Bibliothèque nationale du Québec
2003

IRSST - Direction des communications
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : (514) 288-1551
Télécopieur : (514) 288-7636
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca

© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
janvier 2003.

Modélisation d'un chariot élévateur et de son cariste pour améliorer la sécurité lors de renversements latéraux

Michel Gou¹, Carl-Éric Aubin¹, Maria Olteanu¹,
René Benoît² et Marina Koutchouk¹

¹Département de génie mécanique, École Polytechnique de Montréal
²Sécurité-ingénierie, IRSST

ÉTUDES ET
RECHERCHES

RAPPORT

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca



Cette publication est disponible
en version PDF
sur le site Web de l'IRSST.

CONFORMÉMENT AUX POLITIQUES DE L'IRSST

Les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document
ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

Table des matières

1	RÉSUMÉ	3
2	INTRODUCTION.....	4
3	RAPPEL DE LA PROBLÉMATIQUE.....	4
4	RAPPEL DES OBJECTIFS.....	6
5	RÉSUMÉ DE LA REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	7
6	MÉTHODOLOGIE	8
6.1	ÉVALUATION DES BESOINS DES FABRICANTS DE CHARIOTS ET ACCESSOIRES	9
6.2	DÉVELOPPEMENT DES MODÈLES	9
6.2.1	<i>Choix du logiciel</i>	<i>9</i>
6.2.2	<i>Modélisation mécanique du chariot élévateur</i>	<i>9</i>
6.2.3	<i>Modélisation biomécanique du cariste.....</i>	<i>10</i>
6.2.4	<i>Modélisation de systèmes de sécurité.....</i>	<i>10</i>
6.3	DÉVELOPPEMENT DES SIMULATIONS.....	11
6.3.1	<i>Simulations statiques.....</i>	<i>11</i>
6.3.2	<i>Simulations dynamiques.....</i>	<i>12</i>
6.3.3	<i>Critères de sévérité de traumatismes</i>	<i>13</i>
6.4	DÉVELOPPEMENT DU LOGICIEL CARISSIMO.....	14
6.5	ÉVALUATION DES MODÈLES	14
6.5.1	<i>Exploitation des modèles du chariot et du cariste.....</i>	<i>14</i>
6.5.2	<i>Évaluation préliminaire</i>	<i>16</i>
6.5.3	<i>Essais préliminaires pour la validation expérimentale.....</i>	<i>16</i>
7	RÉSULTATS ET DISCUSSION	17
7.1	RENCONTRES AVEC DES FABRICANTS	17
7.2	DÉVELOPPEMENT DES MODÈLES	20
7.2.1	<i>Choix du logiciel.....</i>	<i>20</i>
7.2.2	<i>Développement du chariot élévateur.....</i>	<i>20</i>
7.2.3	<i>Développement du cariste</i>	<i>21</i>
7.2.4	<i>Développement des systèmes de sécurité</i>	<i>22</i>
7.3	DÉVELOPPEMENT DES SIMULATIONS.....	23
7.3.1	<i>Simulations statiques.....</i>	<i>23</i>
7.3.2	<i>Simulations dynamiques.....</i>	<i>23</i>
7.4	DÉVELOPPEMENT DU LOGICIEL CARISSIMO.....	24
7.5	ÉVALUATION DES MODÈLES	26
7.5.1	<i>Exploitation des modèles.....</i>	<i>26</i>
7.5.2	<i>Évaluation préliminaire</i>	<i>32</i>
7.5.3	<i>Simulations préliminaires pour les validations expérimentales.....</i>	<i>34</i>
7.6	VALIDATION EXPÉRIMENTALE	34
8	CONCLUSION ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE	35
9	COMMUNICATIONS ET RAYONNEMENT	36
10	RÉFÉRENCES.....	38

1 Résumé

Ce projet de recherche financé par l'IRSST fait suite à une problématique industrielle des traumatismes subis par le cariste lors du renversement latéral de son chariot élévateur. L'objectif général de cette étude a été de concevoir CARISSIMO, un logiciel d'aide à la conception des chariots élévateurs, pouvant tester différents dispositifs de sécurité dans différentes conditions d'accidents.

De façon plus précise, un modèle paramétré de chariot élévateur a été développé à l'aide du logiciel de modélisation MADYMO (TNO). Ce modèle permet de représenter la plupart des chariots à fourche en porte-à-faux et contrepoids, d'une capacité nominale de 2000 à 3000 kg, qu'ils soient alimentés à l'essence, au propane ou à l'électricité. Le cariste a été représenté par un mannequin HYBRID III du 50^e percentile, grâce à la base de données de MADYMO. Quelques systèmes de sécurité (ceinture abdominale, accoudoirs, maintiens des épaules, portes) et différentes conditions de renversement : basse vitesse (statique) et haute vitesse (dynamique) ont été testées. Une première version de CARISSIMO (interface usager) a été développée à l'aide du logiciel ACCESS de Microsoft. Cette interface permet de saisir les paramètres nécessaires à la création des modèles du chariot élévateur et du cariste et de définir les conditions de l'accident. Une procédure d'exportation permet de générer tous les fichiers nécessaires pour réaliser automatiquement les simulations avec MADYMO.

Les résultats des simulations statiques et dynamiques montrent que les modèles du chariot et du cariste sont fonctionnels et relativement réalistes, tout au moins d'après les quelques données disponibles de la littérature et selon les intervenants du milieu. Les résultats montrent que le type de sol influence peu les traumatismes du cariste mais que les systèmes de sécurité utilisés ont une très grande influence, tant pour les cas de renversements statiques que dynamiques. Dans l'état actuel des modélisations, les portes et les maintiens des épaules utilisés conjointement avec une ceinture de sécurité abdominale semblent plus efficaces pour protéger le cariste que les accoudoirs avec ou sans ceinture de sécurité abdominale ou sans aucun système de retenue. Cependant, tous ces résultats ne seront confirmés que si le modèle est validé expérimentalement, ce qui est prévu dans la prochaine phase de ce projet de recherche.

2 Introduction

Ce projet de recherche est financé par l'IRSST et fait suite à une problématique industrielle des traumatismes subis par des conducteurs de chariots élévateurs lors de renversements latéraux. L'objectif général de cette étude est de concevoir CARISSIMO, un logiciel d'aide à la conception des chariots élévateurs. Il devrait permettre aux fabricants de chariots élévateurs et d'accessoires de tester différents systèmes de sécurité à mettre en place dans leurs véhicules sous différentes conditions d'accidents (basse/haute vitesse, sol plus ou moins rigide, maintien du volant à 1 ou 2 mains, etc.).

Dans ce rapport final nous ferons d'abord un rappel de la problématique, des objectifs et de la revue de la littérature. Ensuite, nous exposerons la méthodologie suivie tout au long de ce projet de recherche, puis les résultats et leur discussion. Finalement, nous conclurons sur le projet et expliquerons les perspectives de recherche pour mener à terme ce projet.

3 Rappel de la problématique

Le renversement latéral des chariots élévateurs est rapporté fréquemment et ses effets sur les caristes sont souvent fâcheux, voire fatals [1]. Selon la CSST, de 1974 à 1994, le renversement latéral était responsable de 31% des accidents graves ou mortels impliquant des chariots élévateurs, soit environ 4 morts par an au Québec [2] [3]. Les chariots les plus souvent impliqués sont les chariots élévateurs à fourche en porte-à-faux et contrepoids, d'une capacité nominale de 2000 à 3000 kg, qu'ils soient alimentés à l'essence, au propane ou à l'électricité [2]. Ces véhicules évoluent aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur. Les renversements latéraux surviennent lorsque le chariot élévateur est à vide dans 86% des cas [2] ou dans des cas de manœuvre avec la charge en hauteur. Étant donnée sa faible stabilité latérale, un braquage brusque (même à vitesse presque nulle), une vitesse trop élevée en virage (à partir de 9 km/h soit la moitié de sa vitesse maximale [1]), ou la circulation sur un obstacle au sol suffisent à provoquer le renversement du chariot.

À cause de ses caractéristiques intrinsèques, l'amélioration de la stabilité du chariot élévateur est très complexe. De plus, lors d'un renversement latéral, il existe peu de moyens pour protéger le cariste et le temps de renversement est souvent trop court pour qu'il ait le temps de réagir. Dans un effort d'accroître la sécurité, les fabricants ont installé des dispositifs tirés de l'industrie

automobile (comme par exemple des ceintures de sécurité, des sièges enveloppants, des accoudoirs, etc.). Cependant, ils n'ont jamais été validés adéquatement pour le domaine des chariots élévateurs, sachant que la stabilité et le comportement d'un chariot en renversement diffèrent notablement de ceux d'une automobile impliquée dans une collision. Leur efficacité n'est donc toujours pas clairement établie et selon les essais réalisés, le protocole utilisé et l'organisme qui réalise ces essais, les effets des dispositifs de sécurité diffèrent et sont même parfois contradictoires [4] [5-a] [5-e] [6] [7]. Les études déjà réalisées montrent qu'il n'y a pas de solution simple disponible. De plus, suite aux besoins exprimés par les milieux du travail et la CSST, toute solution devra s'intégrer au design des fabricants pour qu'elle ait des chances d'être adoptée.

Actuellement, il n'existe pas d'outil informatique efficace pour concevoir ou évaluer des systèmes de protection actifs ou passifs installés dans des chariots élévateurs. En effet, les fabricants de chariots ne disposent pas, comme c'est le cas dans le secteur automobile par exemple, d'outils informatiques comprenant des modèles biomécaniques perfectionnés permettant d'évaluer et de valider les effets sur l'humain des divers types d'accidents auxquels leurs véhicules peuvent être exposés [8]. Ces modèles sophistiqués ne sont généralement pas accessibles ni disponibles aux fabricants de chariots (coût) mais de toutes façons ils ne sont pas vraiment adaptables car les conditions d'utilisation sont très différentes (vitesse et accélération élevées et grandes déformations pour les véhicules automobiles). Bien qu'il n'existe pas d'encouragement pour que les fabricants de chariots élévateurs se dotent de ce type d'outil informatique de simulation, ils seraient certainement intéressés à en profiter afin d'appuyer le développement de leurs nouveaux produits et ainsi contribuer à l'amélioration de la sécurité de leurs véhicules. Seuls quelques modèles informatiques simplifiés [4] [5] [9] ont été élaborés par des fabricants de chariots élévateurs comme Clark [5-c] [7] et Hyster [4] mais aucun de ces modèles n'est commercialement disponible et les résultats semblent peu probants. De plus, les informations accessibles sur ces études semblent indiquer que leurs approches comportent des lacunes importantes en ce qui concerne la modélisation biomécanique du cariste et de ses liens avec le modèle mécanique du chariot. Par ailleurs, le recours aux essais expérimentaux est possible mais beaucoup trop coûteux [9] tout au moins dans les phases de développement d'un nouveau chariot élévateur. Seuls quelques tests expérimentaux ont déjà été réalisés par des compagnies comme Hyster [4], mais ils sont longs, fastidieux et surtout coûteux pour quantifier différents dispositifs

de sécurité, et les résultats sont très variables car les paramètres importants ne sont pas tous contrôlés correctement. Toutes ces contraintes expliquent sans doute le peu d'avancement de la sécurité des chariots élévateurs.

4 Rappel des objectifs

L'objectif à long terme de cette recherche est d'améliorer la sécurité du cariste manœuvrant un chariot élévateur. Pour ce faire, l'objectif général de ce projet est de développer CARISSIMO, un logiciel de simulation du renversement latéral d'un chariot élévateur et de son cariste, qui permet l'analyse des systèmes de sécurité existants et futurs, pour différents cas de renversements latéraux. CARISSIMO sera ensuite rendu disponible dans un format exploitable par les fabricants de chariots élévateurs et d'accessoires. Ce logiciel a été utilisé l'évaluation de la performance de quelques systèmes de sécurité existants (ceinture de sécurité et supports latéraux) pour des renversements à basse et haute vitesses. Ainsi, les fabricants pourront intégrer, au stade du design, le système de sécurité qu'ils auront évalué comme étant le plus performant.

A plus court terme, l'objectif spécifique de ce projet était de mettre en place le logiciel CARISSIMO et d'en faire une évaluation préliminaire comparativement aux données publiées dans la littérature. Cet objectif, poursuivi pendant ces 2 dernières années, se subdivise en 6 sous-objectifs :

- Définition des besoins et évaluation des attentes des fabricants de chariots et d'accessoires vendus au Québec face au design de dispositifs de sécurité ;
- Développement des modèles du chariot, du cariste et de systèmes de protection ;
- Développement des simulations de renversements latéraux à basse et haute vitesses et prédiction des traumatismes du cariste ;
- Mise en place de l'interface du logiciel CARISSIMO pour qu'elle soit utilisable par les fabricants ;
- Évaluation préliminaire des modèles et simulations en les comparant avec les quelques données disponibles dans la littérature ;
- Développement du devis préliminaire pour la validation expérimentale des modélisations.

5 Résumé de la revue de la littérature

Une revue de littérature exhaustive de la problématique du renversement latéral et des systèmes disponibles pour la protection des caristes est donnée dans le rapport de l'IRSST réalisé en 1997 par Duquette & Benoît [1]. Ce rapport présente les causes du manque de stabilité latérale dynamique des chariots (base de stabilité en triangle, etc.) et les conséquences sur le chariot et le cariste d'un renversement latéral. Les limites des méthodes d'études et des résultats sur l'évaluation de l'efficacité préventive de systèmes de protection de l'opérateur sont décrites et analysées, ainsi que les différents critères (crânio-cérébraux, cervicaux, thoraciques et abdominaux) les plus utilisés dans la littérature pour la prédiction des traumatismes graves lors d'un accident. Les facteurs de risques associés au non-respect des principes ergonomiques sont présentés de même que les besoins prioritaires des caristes. Cette étude démontre qu'il n'existe pas de solution immédiate quant au choix et au développement de systèmes de sécurité performants pour le cariste. Elle conclut que la modélisation est nécessaire pour étudier de façon systématique la problématique des renversements latéraux des chariots élévateurs.

Les résultats d'autres articles de la littérature sur la dynamique du renversement sont résumés dans les tableaux suivants et serviront à notre étude comparative. Pour les détails sur les conditions d'essai et pour les autres caractéristiques, se référer à la littérature [4] [5] [10].

Tableau 1 : résumé de la littérature sur la dynamique du renversement de type statique (données expérimentales sauf * obtenues par simulations)

Accélération max. résultante de la tête (m/s²)	5 à 79 g avec un siège traditionnel [5-a]	385 à 744 g avec un siège Clark [5-a]	
	24 à 305 g avec une ceinture en tenant le volant [5-c]	39 à 94 g avec une ceinture + maintien des épaules en tenant le volant [5-c]	
	14 à 130 g sans ceinture [5-i]	157 à 198 g avec ceinture [5-i]	
Accélération max. rés. de la cage thoracique	8 à 22 g avec un siège traditionnel [5-a]	18 à 56 g avec un siège Clark [5-a]	
	36 à 112 g avec une ceinture en tenant le volant [5-c]	30 à 104 g avec une ceinture + maintien des épaules en tenant le volant [5-c]	
	30 à 51 g sans ceinture [5-i]	37 à 95 g avec ceinture [5-i]	
Accélération max. rés. du bassin	59 à 305 g sans ceinture [5-i]	36 à 310 g avec ceinture [5-i]	
Accélération max. rés. au niveau du siège	19 à 45 g avec un siège traditionnel [5-a]	31 à 45 g avec un siège Clark [5-a]	
Temps de renversement	1.4 s [1]*	1.3 s [1]	1.05 s en moyenne [2-d]
Temps de bascule	1.1 à 1.9 s [2-d]	1 à 1.5 s [2-e]	
Temps de contact avec le sol	1.9 à 3.4 s [2-d]		

Tableau 2 (suite): résumé de la littérature sur la dynamique du renversement de type statique (données expérimentales sauf * obtenues par simulations)

HIC	75 à 187 siège Clark (maintien des épaules) sans ceinture, position normale du cariste, mains tenant le volant [4]	104 à 542 siège Clark (maintien des épaules) avec ceinture, position normale du cariste, mains tenant le volant [4]
	651 à 1135 siège Hyster (maintien des hanches) sans ceinture, position normale du cariste, mains tenant le volant [4]	404 à 865 siège Hyster (maintien des hanches) avec ceinture, position normale du cariste, mains tenant le volant [4]
	378 à 1088 siège avec maintien des épaules sans ceinture, [4]	260 à 837 siège avec maintien des épaules avec ceinture, [4]
	13 à 14 siège sans ceinture, [4]	12 siège avec ceinture, [4]
	329 à 385 siège Clark (maintien des épaules) sans ceinture, position en arrière du cariste, mains tenant le volant [4]	68 à 897 siège Clark (maintien des épaules) avec ceinture, position en arrière du cariste, mains tenant le volant [4]
	65 à 167 siège Hyster (maintien des hanches) sans ceinture, position en avant du cariste, mains tenant le volant [4]	231 à 253 siège Hyster (maintien des hanches) avec ceinture, position en avant du cariste, mains tenant le volant [4]
	1815 à 8654 pour un siège Clark (maintien des épaules) avec ceinture [5-a]	4 à 64 pour un siège traditionnel sans ceinture [5-a]
	28 à 1240 avec une ceinture en tenant le volant fermement [5-c]	88 à 120 avec une ceinture + maintien des épaules en tenant le volant fermement [5-c]
	1200 (moyenne) avec siège conventionnel sans ceinture [5-e]	1164 (moyenne) avec siège conventionnel avec ceinture [5-e]
	1240 (moyenne) avec siège avec maintien des épaules sans ceinture [5-e]	2331 (moyenne) avec siège avec maintien des épaules avec ceinture [5-e]
	8 à 216 sans ceinture [5-i]	469 à 674 avec ceinture [5-i]

Tableau 3 : résumé de la littérature sur la dynamique du renversement de type dynamique (données expérimentales)

HIC	34 à 652 siège Hyster (maintien des épaules) avec ceinture [4]	242 à 682 siège Clark (maintien des hanches) avec ceinture [4]
Force de tension dans la ceinture	3025 à 5173 N (680 à 1163 lb) maximum [4]	
Vitesse d'impact des épaules au sol	9.6 à 20 km/h [4]	
Vitesse d'impact du haut du FOPS au sol	18.2 à 23.0 km/h [4]	

6 Méthodologie

De façon générale, les étapes de la méthodologie sont: (1) d'évaluer les besoins des fabricants, (2) de créer les modèles cinématiques du chariot élévateur et du cariste en tenant compte de besoins exprimés par les fabricants lors de nos rencontres, (3) de simuler des conditions de renversements latéraux, (4) de développer l'interface CARISSIMO de saisie de données et (5) de simuler plusieurs situations de systèmes de sécurité et comparer les résultats aux données prélevées dans la littérature existante. Les paragraphes suivants résument les grandes étapes de ce projet de recherche et donnent les derniers résultats. Les détails des étapes et les résultats intermédiaires sont rapportés dans les annexes 1 et 2. Les résultats finaux de ces étapes sont présentés dans le même ordre au paragraphe 7.

6.1 Évaluation des besoins des fabricants de chariots et accessoires

Le premier volet du projet de recherche a consisté à cibler et à contacter des fabricants de chariots élévateurs et d'accessoires de façon à connaître leurs besoins vis-à-vis de la problématique de la sécurité du cariste. Quelques fabricants et distributeurs de chariots et accessoires ainsi que des intervenants impliqués dans la recherche et la normalisation sur la sécurité des chariots ont été rencontrés. Les besoins et attentes ont été déterminés en discutant avec eux de leurs moyens actuels d'améliorer la sécurité des véhicules, et en particulier de résoudre la problématique de renversement latéral des chariots élévateurs. Par ailleurs, ces rencontres ont permis d'évaluer leur volonté et possibilité, aussi bien matérielle qu'humaine, de s'impliquer dans notre projet.

6.2 Développement des modèles

Les grandes lignes du développement des modèles du chariot élévateur, du cariste et des systèmes de sécurité sont exposées dans les paragraphes ci-dessous. Les annexes 1 et 2 exposent des détails plus techniques.

6.2.1 Choix du logiciel

La première étape du développement des modèles visait d'abord à faire l'évaluation et le choix du logiciel de modélisation par corps rigide. Parmi la dizaine de logiciels répertoriés, deux ont été considérés de façon plus particulière : MADYMO [11] et ADAMS. Ce dernier qui avait été utilisé pour l'étude de faisabilité du projet [12] mais il posait des problèmes au niveau de la modélisation du cariste. Les critères de sélection ont été basés sur les capacités de modélisation à la fois mécanique et biomécanique, sur la possibilité de paramétrisation des modèles, ainsi que sur la plate-forme utilisée pour s'assurer qu'elle soit compatible avec celle des fabricants.

6.2.2 Modélisation mécanique du chariot élévateur

La catégorie de chariots visée par l'étude comprend les chariots à fourches en porte-à-faux et contrepoids, d'une capacité nominale de 2000 à 3000 kg à l'essence, au propane ou à l'électricité car il s'agit des chariots élévateurs les plus sensibles aux renversements latéraux [1]. La géométrie du chariot a été simplifiée afin de ne conserver que les éléments nécessaires et suffisants à la définition du modèle informatique. De plus, ce modèle a été paramétré afin de représenter tout type de chariot de la catégorie choisie en ne saisissant que les paramètres

caractéristiques (comme la largeur de voie, l'empattement, le diamètre des pneus avant, la masse du contrepoids, les inerties du châssis, etc.). Pour cela, il a fallu définir les dimensions et propriétés caractéristiques d'un chariot permettant de modéliser les différents types de chariots visés dans le cadre du projet, puis programmer les fichiers du modèle de chariot élévateur.

Un véhicule-test (Toyota 42-5FG20) disponible à l'École Polytechnique de Montréal a été étudié et mesuré afin d'obtenir les paramètres caractéristiques nécessaires à notre modélisation. D'autres données telles les masses, inerties, centres de gravités ont été calculées ou estimées à partir de modèles géométriques solides de ces pièces réalisés à l'aide du logiciel de CAO CATIA. Éventuellement, ces données pourraient être mesurées directement sur le chariot étudié.

6.2.3 Modélisation biomécanique du cariste

La modélisation du cariste a été développée grâce à la base de données de mannequins disponible dans le logiciel de modélisation MADYMO version 5.4. Le mannequin anthropomorphe Hybrid III du 50^e pourcentile (en poids et taille) a été sélectionné car il est le plus approprié pour nos simulations d'un renversement latéral de chariot élévateur. En effet, il représente un conducteur « moyen » de chariot élévateur. Toutes les propriétés biomécaniques du mannequin (raideur et amortissement des articulations, masses et inerties des 37 différents segments du corps, etc.) proviennent directement de la base de données de MADYMO. Les propriétés biomécaniques du mannequin, validées par TNO (concepteur de MADYMO), représentent donc le mannequin réel Hybrid III du 50^e pourcentile en poids et taille.

6.2.4 Modélisation de systèmes de sécurité

Plusieurs systèmes de sécurité ont été modélisés, soient un siège à support latéral des hanches (ou accoudoirs), un siège à support latéral des épaules, une ceinture de sécurité abdominale (ceinture pelvienne), ainsi que des portes. En effet, il s'agit des dispositifs les plus utilisés actuellement et référencés dans la littérature, bien qu'il en existe de nombreuses autres sortes, comme par exemple un casque ou des sacs gonflables qui pourront être modélisés plus tard si nécessaire. Dans tous les cas, les contacts entre le cariste et ces systèmes de sécurité ont été définis en fournissant les propriétés de raideurs du contact, l'amortissement et la friction.

6.3 Développement des simulations

Deux types de simulations du renversement latéral ont été développés, similaires à celles faites lors de l'étude de faisabilité [12] et celles utilisées par Johnson [4] : les simulations à basse vitesse dites “statiques” et à plus haute vitesse dites “dynamiques”. L'analyse des résultats et le calcul des critères de sévérité de traumatismes pour chacune des simulations a permis de quantifier l'effet sur le cariste de systèmes de protection et des autres paramètres testés.

Les rapports d'étapes des annexes 1 et 2 exposent tous les détails techniques de la méthodologie suivie pour les simulations statiques et dynamiques du renversement du chariot élévateur et du cariste. Seules les grandes lignes de ces modélisations sont exposées dans les paragraphes ci-dessous.

6.3.1 Simulations statiques

Les simulations « statiques » correspondent à une situation de renversement “instable” à très basse vitesse. Elles sont approximées en mettant un chariot élévateur à l'arrêt sur une table de renversement qui bascule à une vitesse angulaire constante de $30^\circ/\text{seconde}$ ou 0.523 rad/s (figure 1). Des paramètres de friction entre le chariot et le sol ont été introduits afin de permettre au chariot de glisser sur le sol après l'impact. Les propriétés d'impacts sur le sol (raideur, amortissement et friction) ont été ajustées en fonction du type de sol et des propriétés de contact des segments du cariste ou du chariot concernés.

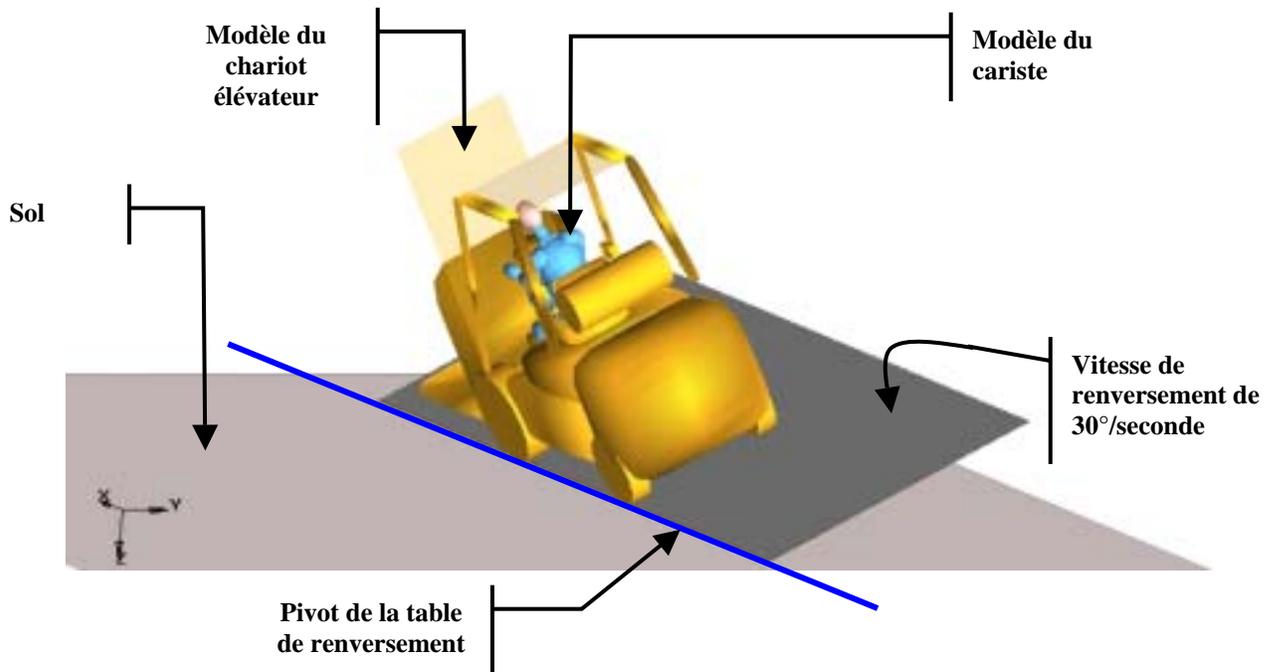


Figure 1 : points importants de la simulation statique

6.3.2 Simulations dynamiques

Ces simulations correspondent à une situation où il existe une instabilité du chariot à cause des forces centripètes générées lors de la prise de virages à plus haute vitesse (figure 2).

La modélisation dynamique est réalisée en soumettant le modèle du chariot élévateur et du cariste à un champ d'accélération normal A_c et tangentiel A_t variable qui tient compte du changement de direction du vecteur vitesse ainsi que de la variation de la vitesse dans le temps. Ce champ d'accélération est équivalent à l'accélération que subirait le chariot lors de la prise d'un virage donné à une certaine vitesse initiale, le cariste pouvant freiner plus ou moins fortement (figure 3).

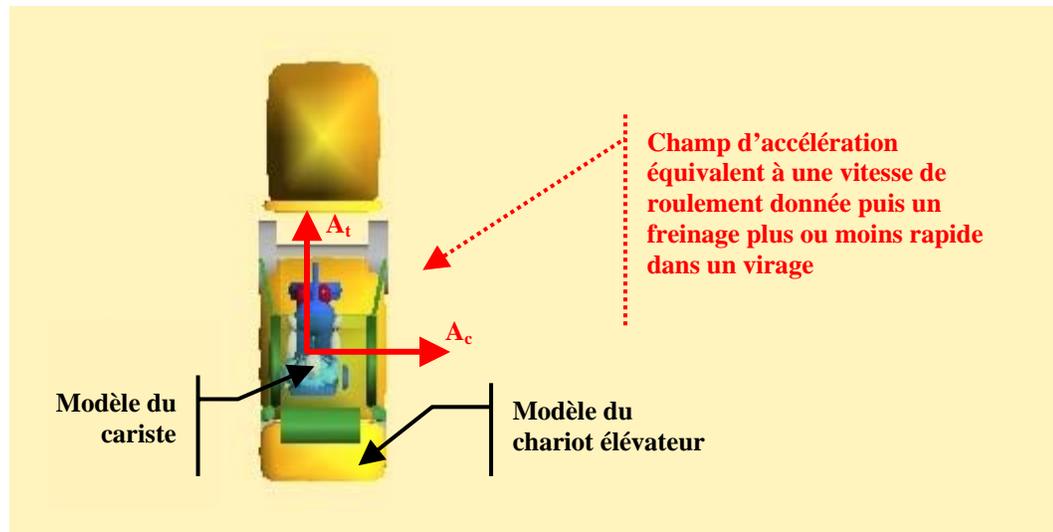


Figure 2 : points importants de la simulation dynamique

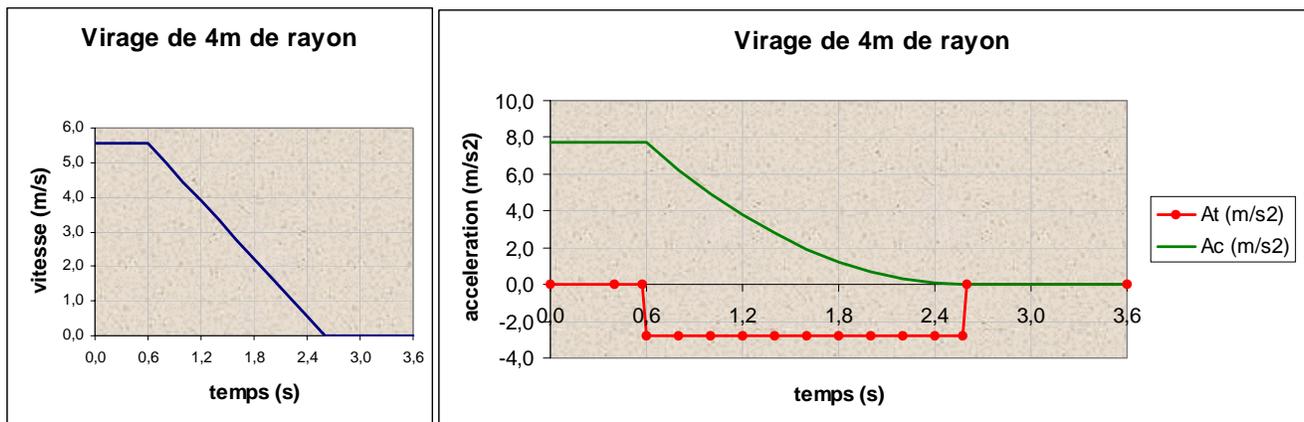


Figure 3 : champ d'accélération pour une vitesse initiale de 20 km/h puis un freinage « moyen » de 0.28g

6.3.3 Critères de sévérité de traumatismes

Les traumatismes crânio-cérébraux sont prédominants lors du renversement latéral d'un chariot élévateur. Dans un premier temps, le critère HIC (Head Injury Criterion) [1, 4] et les accélérations maximales résultantes de la tête et du torse ont été considérées, car ce sont les plus utilisés dans la littérature pour le renversement latéral. Le critère HIC est calculé à partir de l'accélération résultante au centre de gravité de la tête en fonction du temps selon la surface sous cette courbe sur une période de temps donnée, en général 36 ms [1] [12] [13]. Une évaluation de l'animation de la simulation permettait de vérifier que le cariste ne se fait pas écraser par la structure de protection, ce qui se produit régulièrement dans les renversements sans ceinture de sécurité.

6.4 Développement du logiciel CARISSIMO

Le logiciel CARISSIMO a pour premier objectif d'être une interface conviviale au logiciel de simulation qui permette l'exploitation des modélisations et simulations par les fabricants de chariots élévateurs et d'accessoires pour un design intégré d'éléments de sécurité. Cette interface a été développée à l'aide du logiciel ACCESS de Microsoft.

Les critères de design de CARISSIMO étaient de :

- Spécifier les paramètres caractéristiques associés à la définition du modèle du chariot élévateur (empattement, diamètre des roues avant, masse des fourches, inerties du contrepoids, espacement en latéral des fourches, etc.) ;
- Positionner le cariste (angle du dos, position des mains sur le volant, force de préhension du volant) ;
- Spécifier les paramètres du (des) modèle(s) de systèmes de sécurité à intégrer au chariot élévateur (accoudoirs, ceinture de sécurité abdominale, etc.),
- Choisir les conditions de renversement latéral (statique : vitesse de montée de la plaque ; dynamique : vitesse de roulement, de freinage ; type de sol, etc.)
- Gérer la base de données (sauvegarder, modifier, copier, dupliquer, etc.) ;
- Exporter les informations pour créer les modèles et lancer les simulations dans le logiciel de simulation dynamique.

De cette façon, le fabricant n'aura qu'à saisir les paramètres requis via l'interface interactive CARISSIMO pour créer facilement le modèle de chariot élévateur et son cariste dans les conditions voulues. Le fabricant n'aura donc besoin d'aucune connaissance du logiciel de modélisation pour arriver à ses fins.

6.5 Évaluation des modèles

6.5.1 Exploitation des modèles du chariot et du cariste

Plusieurs séries de simulations ont été réalisées pour exploiter les modèles du chariot élévateur et du cariste développé.

La toute première étude [17] consistait à identifier les paramètres du chariot les plus influents sur la sensibilité du chariot élévateur au renversement latéral lors d'une simulation statique. Un plan statistique d'expérimentation a permis d'étudier les effets de 15 paramètres caractéristiques sur le renversement latéral du chariot élévateur, c'est-à-dire sur l'angle critique d'inclinaison de la plaque qui cause un renversement du véhicule. Ces 15 paramètres sont la largeur hors-tout, la largeur de voie avant et arrière, la masse et l'inertie I_{xx} du châssis, la position en z du CG du contrepoids, l'inertie I_{xx} du contrepoids, la masse et l'inertie I_{xx} de l'essieu arrière, la position en z du CG du moteur, la masse et l'inertie I_{xx} du moteur, la masse du mât, l'angle limite de rotation du pivot de l'essieu arrière et la hauteur en z du pivot de l'essieu arrière.

La deuxième étude [18] visait à identifier les paramètres du siège ayant le plus d'influence sur les traumatismes subis par le cariste lors du renversement latéral du chariot. Un plan d'expérimentation a permis d'étudier les effets de 3 paramètres sur le HIC et la vitesse résultante de la tête lors de son impact au sol. Ces 3 paramètres sont la rigidité de la mousse de polyuréthane, le coefficient de friction du contact entre le cariste et le siège et les protubérances du dossier.

La troisième série consistait à tester d'autres paramètres dans le cas « statique », c'est-à-dire avec un chariot élévateur à l'arrêt sur une plaque de levage s'inclinant à la vitesse angulaire donnée. Les tests d'influence suivants ont été réalisés:

- Vitesse angulaire de 30 à 60°/seconde ;
- Raideurs des pneus du chariot élévateur de 600 à 6666 kN/m (1500 kN/m par défaut);
- Raideurs du sol de 25 à 200 MN/m (100 MN/m par défaut);
- Systèmes de sécurité : ceinture de sécurité abdominale, ceinture de sécurité abdominale + accoudoirs, ceinture de sécurité abdominale + maintiens latéraux des épaules, ceinture de sécurité abdominale + portes, accoudoirs, maintiens latéraux des épaules, portes, aucun systèmes de sécurité (ceinture de sécurité abdominale par défaut);
- Force maximale de maintien du volant de 190 à 820 N (460N par défaut);
- Géométrie des pneus;
- Raideurs de torsion du volant mobile;
- Modélisation du maintien du volant.

Lorsque l'influence d'un paramètre n'est pas testée, ce paramètre est égal à sa valeur par défaut définie précédemment.

La quatrième série consistait à tester plusieurs paramètres dans le cas « dynamique », c'est-à-dire avec un chariot élévateur roulant à une vitesse donnée avant la prise d'un virage. Les tests d'influence suivants ont été réalisés:

- Vitesse de roulement de 10 à 20 km/h (20 km/h par défaut);
- Systèmes de sécurité : ceinture de sécurité abdominale + accoudoirs, ceinture de sécurité abdominale et maintiens latéraux des épaules par défaut, aucun système de sécurité (ceinture de sécurité abdominale + maintiens latéraux des épaules) ;
- Influence du maintien du volant ;
- Rayon de virage de 4 ou 5 m (4m par défaut);
- Vitesse de freinage.

Lorsque l'influence d'un paramètre n'est pas testée, ce paramètre est égal à sa valeur par défaut définie précédemment. Les autres paramètres sont fixés à 100MN/m pour le sol (asphalte), 1500 kN/m pour les pneus (superélastiques), maintien du volant à 2 mains (12 degrés de liberté) avec force moyenne de préhension, et freinage de 0.28g effectué 0.6 seconde après l'entrée dans le virage.

6.5.2 Évaluation préliminaire

Une première évaluation de la modélisation a été réalisée en comparant les principaux résultats des simulations à quelques données publiées [4] [5] [10]. Les paramètres considérés sont le HIC, l'accélération maximale de la tête du cariste et le temps de renversement.

6.5.3 Essais préliminaires pour la validation expérimentale

Une série de simulations a été réalisée de façon à connaître les caractérisations expérimentales nécessaires pour la validation subséquente des modèles de chariot élévateur et du mannequin. Des tests d'influence des raideurs des portes, du siège et de la ceinture de sécurité, ainsi que de l'amortissement et du frottement du contact chariot/sol ont été réalisés pour déterminer si les paramètres ont besoin d'être caractérisés expérimentalement.

7 Résultats et discussion

Les résultats finaux des différentes étapes, présentées dans la méthodologie au paragraphe 6, sont présentées ci-dessous dans le même ordre.

7.1 Rencontres avec des fabricants

Tel que prévu dans ce projet, des intervenants ont été rencontrés afin de présenter le projet et susciter leur intérêt. Le tableau 4 suivant résume ces rencontres.

Tableau 4 : rencontres avec les intervenants

Compagnie, contacts	Lieu, date, personnel du projet	Résultats de cette rencontre
UNIVERSITÉ DE VALENCIENNES	Valenciennes (France) Juillet 1998 Carl-Eric Aubin	Visite du laboratoire d'accidentologie et discussion avec le professeur Pascal Drazetic (groupe de recherche « dynamique rapide et collision »).
ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL	Montréal (Québec)	Visite de Patrice Donati de l'INRS (Institut National de Recherche en Sécurité; équivalent de l'IRSST en France). Présentation de notre projet et discussion à propos de leur projet CEMAMO sur la conception et l'ergonomie des machines mobiles.
MANITOU (fabricant de chariots élévateurs) M. Alain Deux, directeur Études et Développement et M. Jean-Hugues Faivre, ingénieur responsable du bureau d'Études	Ancenis (France) 25 février 1999 René Benoît et Michel Gou	Présentation du projet de modélisation ainsi que de quelques résultats des modèles en version préliminaire. Les personnes rencontrées considèrent le projet intéressant et sont prêtes à fournir un certain appui tels que des caractéristiques de leurs chariots. Ils sont intéressés à suivre le projet et à prodiguer leurs conseils et leurs commentaires.
CLARK (fabricant de chariots élévateurs) M. Bryan Uittenbogaard, directeur de l'ingénierie chez CLARK	Lexington (Kentucky, USA) 13 juillet 1999 René Benoît et Marina Koutchouk	Présentation du projet de modélisation ainsi que de quelques résultats des modèles en version préliminaire. Il considère notre projet intéressant et serait prêt à fournir un certain appui en nous fournissant des paramètres pour générer nos modèles ainsi que des conseils. Il s'est engagé à montrer notre présentation à son groupe d'ingénierie qui emploie environ 70 ingénieurs.

<p>LIFTOW (concessionnaire de chariots élévateurs TOYOTA)</p>	<p>Lachine (Québec) 14 octobre 1999 Michel Gou, René Benoît et Marina Koutchouk</p>	<p>Invitation de LIFTOW pour assister à la présentation de leur nouveau modèle TOYOTA SÉRIE 7, avec son système SAS (System of Active Safety). Ce système semble permettre, entre autres, de retarder le renversement latéral si le chariot est peu déséquilibré en bloquant le mouvement de l'essieu arrière oscillant. De plus, LIFTOW doit nous introduire au niveau de l'ingénierie chez TOYOYA, afin de présenter et de discuter de notre projet. Cette démarche est en cours et devrait aboutir d'ici peu.</p>
<p>CSA International (canadian standard association)</p>	<p>Toronto (Ontario) novembre 2000 René Benoît et Marina Koutchouk</p>	<p>Invitation de CSA pour présenter notre projet lors de leur « CSA technical meeting on lift truck – B335 ». Ce comité semble avoir bien apprécié notre travail et souhaiterait suivre les développements de notre recherche. Quelques membres du comité sont prêts à nous aider en nous fournissant des données sur les accessoires de chariots élévateur (Cascade, mâts-fourches) ou en nous référant au groupe d'ingénierie de leur compagnie pour présenter notre projet (Hyster).</p>
<p>INRS</p>	<p>Vandoeuvre (France) 4 juillet 2001 René Benoît et Carl-Eric Aubin</p>	<p>Participation au comité de pilotage du projet CEMAMO de l'INRS sur la problématique globale des chariots élévateur. Nous avons rencontré entre autres Mme F. Hella, et P. Donati,, co-responsables du projet de même que P. Lemerle et J. Rebelle responsables de la modélisation du renversement. Nous avons convenu de collaborer encore plus étroitement, ce qui se concrétisera par la venue à l'École Polytechnique en septembre 2001 de David Feutry afin de se familiariser avec notre approche et le programme développé par Marina Koutchouk. Pour le moment l'INRS n'est pas avancé sur le plan de la modélisation et leur approche diffère. L'INRS envisage de modéliser séparément le chariot et le cariste pour ensuite combiner les deux modèles. Par contre nous sommes d'accord sur la nécessité de d'unir nos efforts pour la validation expérimentale et le développement d'un modèle efficace.</p>

<p>Université de Duisburg</p>	<p>Duisburg (Allemagne) 7 juillet 2001 René Benoît et Carl-Eric Aubin</p>	<p>Nous avons visité le laboratoire de l'Université de Duisburg en Allemagne. Cette université collabore avec l'INRS pour l'étude du renversement des chariots. Nous y avons rencontré en autres le directeur du <i>laboratoire d'ingénierie de fabrication</i>, le professeur Gunter Pfeiffer, le professeur Gerd Witt et l'ingénieur qui a participé au développement du banc d'essai. il s'agit d'un banc d'essai conçu et réalisé pour effectuer des essais de renversement statiques et dynamiques de chariot élévateurs avec pour objectifs de tester différents dispositifs passifs de retenu du cariste. Ces dispositifs sont principalement des ceintures de différents types, des sièges et des portes (ou l'équivalent). Ce banc présente plusieurs avantages relatifs à sa simplicité de réalisation et de modélisation numérique du chariot. Il ressort cependant clairement des discussions que nous avons eu avec les allemands que leur modèle ne permet absolument pas de prévoir le comportement de l'androïde (ou du cariste). Nous avons aussi exploré les possibilités d'une collaboration entre l'université de Duisburg, l'École Polytechnique de Montréal, l'INRS et l'IRSST, ce à quoi les allemands se sont dit ouverts.</p>
--------------------------------------	---	--

Depuis le début de la subvention, des fabricants se sont intéressés au projet mais ne s'y sont pas encore fortement impliqués car celui-ci était encore en phase de développement. Le projet étant maintenant beaucoup plus avancé et plus concret (modélisations statiques et dynamiques, interface CARISSIMO fonctionnelles), les prochaines rencontres devraient donc être plus faciles et plus constructives. Nous poursuivons donc nos efforts pour rencontrer des responsables de l'ingénierie et de la sécurité chez TOYOTA ainsi que chez d'autres fabricants. Nous souhaitons obtenir leur support et leur appui concrets dans cette démarche d'amélioration de la sécurité des caristes.

7.2 Développement des modèles

7.2.1 Choix du logiciel

L'étude de faisabilité de la modélisation des chariots élévateurs a été réalisée à l'aide du logiciel ADAMS [12] [13], qui avait été également utilisé par Johnson pour les simulations de renversements de chariots Hyster [4]. Cependant, étant donné les problèmes de modélisation du corps humain rencontrés avec ADAMS [12, 13], une étude d'applicabilité du logiciel MADYMO à la modélisation d'un chariot élévateur, de son conducteur et à la simulation d'un renversement latéral a été faite. Il ressort que MADYMO semble plus pertinent, mieux adapté et performant qu'ADAMS pour ce projet de recherche. Il a donc été retenu pour la suite du projet. Un cours de formation sur le logiciel a été suivi (Detroit, Michigan, avril 1999) pour que son utilisation soit la plus performante possible.

7.2.2 Développement du chariot élévateur

Le modèle de chariot élévateur créé dans l'étude de faisabilité avec ADAMS [12] est montré sur la figure 4a tandis que le modèle de chariot créé avec MADYMO est montré à la figure 4b. Ce chariot élévateur, un Toyota 42-5FG20, dont le modèle actuel est tout à fait fonctionnel dans MADYMO, comprend 11 corps (excluant les systèmes de sécurité), soient (1) le moteur, (2) le système châssis, volant et pédales, (3) le contrepoids, (4) la structure de sécurité, (5) le système fourches, grille et mât, (6) les roues avant, (7) les roues arrière, (8) le réservoir externe de carburant, (9) le siège, (10) l'essieu avant et (11) l'essieu arrière oscillant limité à $\pm 5^\circ$.

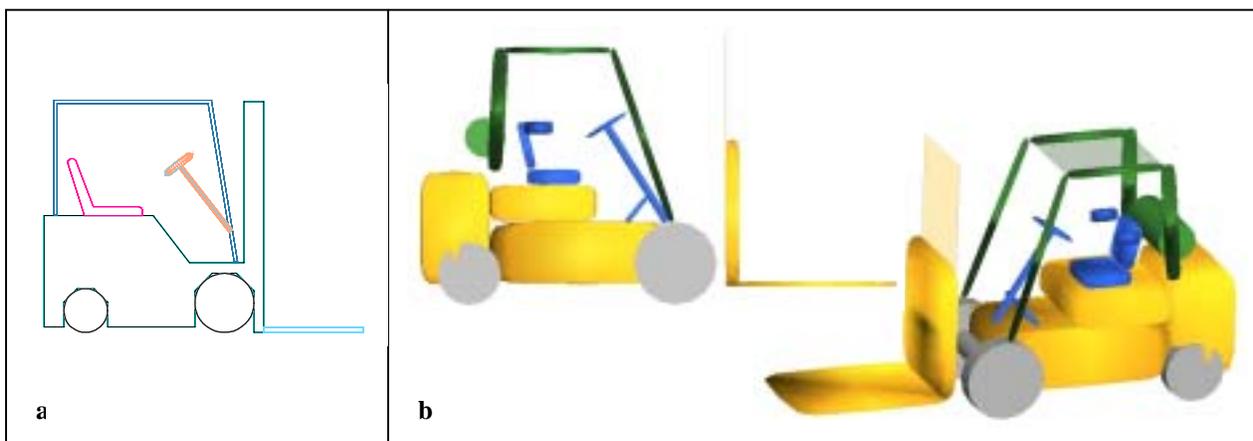


Figure 4 : modèle du chariot élévateur réalisé avec ADAMS (a), comparativement à celui réalisé avec MADYMO (b)

Les parties du chariot élévateur sont considérées comme rigides. Les contacts entre ces pièces et les éléments extérieurs (cariste, sol, plaque de levage) sont rigides, à l'exception du volant, du siège (en mousse de polyuréthane) et des pneus (pneumatiques ou pleins) qui sont flexibles. Une géométrie suffisamment détaillée permet de gérer correctement les impacts du chariot élévateur au sol et les contacts avec le cariste lors du renversement latéral.

Le modèle de chariot est paramétré pour ses dimensions et propriétés mécaniques. Par exemple, il est possible de spécifier son empattement, sa largeur de voie avant et arrière, la masse et les inerties du contrepoids, etc. Ses variables sont saisies à l'aide du logiciel CARISSIMO. En tout, le chariot comprend 156 paramètres, dont 11 pour le moteur, 23 pour le système châssis, volant et pédales, 12 pour le contrepoids, 19 pour la structure de sécurité, 17 pour le système fourches, grille et mât, 18 pour les roues avant et arrière, 24 pour le réservoir externe de carburant, 12 pour le siège, et 20 pour les essieux.

7.2.3 Développement du cariste

Le modèle de cariste choisi est un mannequin HYBRID III du 50^e pourcentile qui représente un conducteur « moyen » de chariot élévateur. La modélisation préliminaire du cariste sur Adams comportait 12 segments tandis que le modèle raffiné de MADYMO comporte 37 segments (figure 5). Les caractéristiques de l'étude préliminaire sont rapportées dans le rapport [12], tandis que la suite de rapport traite du modèle développé sur MADYMO.

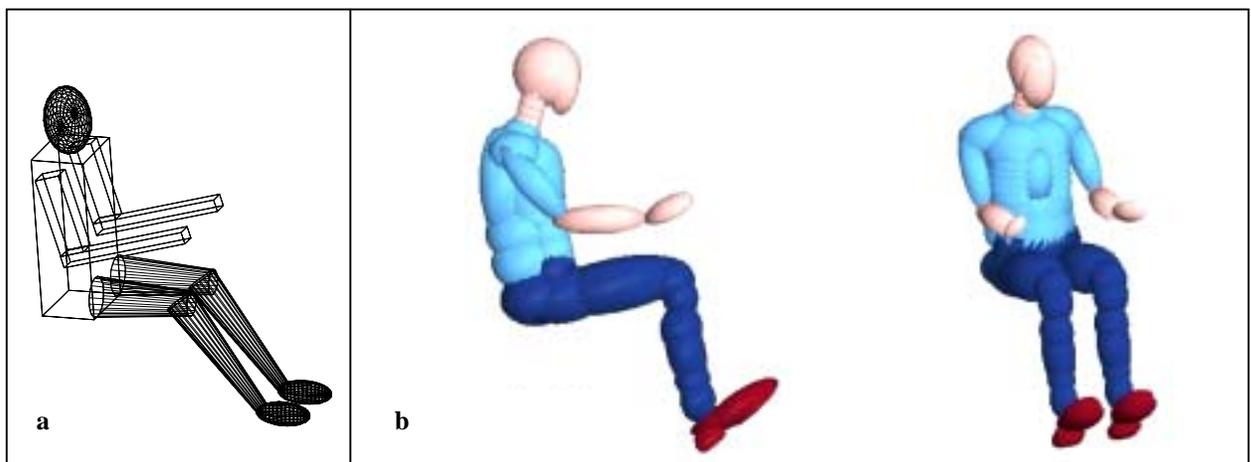


Figure 5 : modélisation du cariste sur ADAMS (a) et MADYMO (b)

La plupart des segments de l'androïde ont des propriétés de contact fournies avec MADYMO permettant de gérer les contacts de l'androïde avec son environnement. Cependant, certains segments (abdomen, cou, tête, épaules, bras, mains et cuisses) n'ont pas de propriétés de contact associées. Il a donc fallu poser des hypothèses sur les raideurs de contact manquantes, et nous avons donc utilisé les raideurs d'autres segments qui « ressemblent » au segment concerné ou encore des raideurs provenant de la littérature : les raideurs de contact des cuisses, des bras et des mains ont été posées équivalentes à celles des bas des jambes ; les raideurs de contact des épaules et de l'abdomen sont considérées équivalentes à celles des hanches et du bas du torse ; la raideur de contact de la tête a été fixée à partir de données d'un rapport SAE sur les renversements de camions [15].

Les propriétés biomécaniques des segments et articulations du cariste sont ainsi définies pour lui donner un comportement dynamique réaliste lors du renversement latéral du chariot et tous les contacts sont définis avec son environnement (raideurs, amortissement et friction).

7.2.4 Développement des systèmes de sécurité

La ceinture de sécurité abdominale modélisée dans MADYMO est composée de 4 éléments rigides. Pour gérer le comportement de la ceinture, nous avons utilisé une fonction de chargement (fonction force-allongement relatif) de la ceinture issue d'exemples de MADYMO.

Les maintiens latéraux sont représentés par des ellipsoïdes, ayant les dimensions réelles des accoudoirs et des maintiens des épaules. Leurs propriétés de contacts, assez rigides, sont identiques. Des portes pleines sont modélisées à l'aide de deux ellipsoïdes qui descendent jusqu'au châssis. La géométrie est très simplifiée, mais devrait donner une bonne idée de l'influence des portes. Les propriétés de contacts sont données par la définition de la même fonction force - enfoncement que les accoudoirs et maintiens des épaules, comme première approximation. Une étude de l'influence de la raideur de la porte a été faite, mais les traumatismes du cariste ne changent quasiment pas même si la porte est dix fois plus rigide.

7.3 Développement des simulations

7.3.1 Simulations statiques

Une simulation statique a été réalisée avec les conditions les plus « standards » de renversement à basse vitesse, à 30°/s. Le véhicule est muni de pneus superélastiques se renversant sur un sol en asphalte avec un conducteur tenu par une ceinture de sécurité abdominale qui maintient le volant à 2 mains avec une force moyenne de préhension. Les résultats sont donnés au tableau 5. D'autres simulations ont été réalisées et sont présentées dans le paragraphe 7.5.1 d'exploitation des modèles.

Tableau 5 : résultats statiques avec ceinture

Ceinture de sécurité abdominale	
Critère HIC	4078
Accélération max. résultante de la tête (m/s ²)	4415
Accélération max. résultante du haut du torse (m/s ²)	835
Accélération max. résultante du bas du torse (m/s ²)	241
Vitesse max. résultante de la tête (m/s)	4.16
Vitesse max. résultante du haut du torse (m/s)	3.49
Vitesse max. résultante du bas du torse (m/s)	2.92

Le HIC est très élevé, supérieur au seuil de risque d'apparition de lésion cérébrale de 1000.

7.3.2 Simulations dynamiques

Une simulation dynamique a été réalisée avec les conditions les plus représentatives d'un renversement à haute vitesse, soit avec un chariot roulant à 20 km/h puis freinant à 0.28g 0.6 seconde après l'entrée dans un virage de 4 mètres. Le véhicule est muni de pneus superélastiques se renversant sur un sol en asphalte avec un conducteur tenu par une ceinture de sécurité abdominale et des maintiens latéraux des hanches qui maintient le volant à 2 mains avec une force moyenne de préhension. Les résultats numériques sont donnés au tableau 6. D'autres simulations ont été réalisées et sont présentées dans le paragraphe 7.5.1 d'exploitation des modèles.

Tableau 6 : résultats de prise de virage de 4 à 20 km/h et freinage de 0.28g

Ceinture de sécurité abdominale et accoudoirs	
Critère HIC	2801
Accélération max. résultante de la tête (m/s^2)	4041
Accélération max. résultante du haut du torse (m/s^2)	640
Accélération max. résultante du bas du torse (m/s^2)	478
Vitesse max. résultante de la tête (m/s)	5.69
Vitesse max. résultante du haut du torse (m/s)	5.29
Vitesse max. résultante du bas du torse (m/s)	4.81

Le HIC est encore élevé et supérieur au seuil de risque d'apparition de lésion cérébrale de 1000.

7.4 Développement du logiciel CARISSIMO

CARISSIMO a été créé dans Microsoft Access. Une version de démonstration est actuellement fonctionnelle. Le menu principal de CARISSIMO permet, comme on peut le voir à la figure 6a, de choisir les différentes options du logiciel, soit ::

- (1) saisir ou modifier les données relatives aux 156 paramètres du chariot élévateur (figure 6b),
- (2) fournir les données concernant les conditions de l'accident (9 paramètres) (figure 6c),
- (3) positionner le conducteur (4 paramètres) (figure 6d) et
- (4) choisir les systèmes de sécurité (165 paramètres minimums), ainsi que
- (5) gérer la base de données.

De plus amples détails sont donnés dans l'annexe 2.

« Modélisation d'un chariot élévateur et de son cariste pour améliorer la sécurité lors de renversements latéraux »

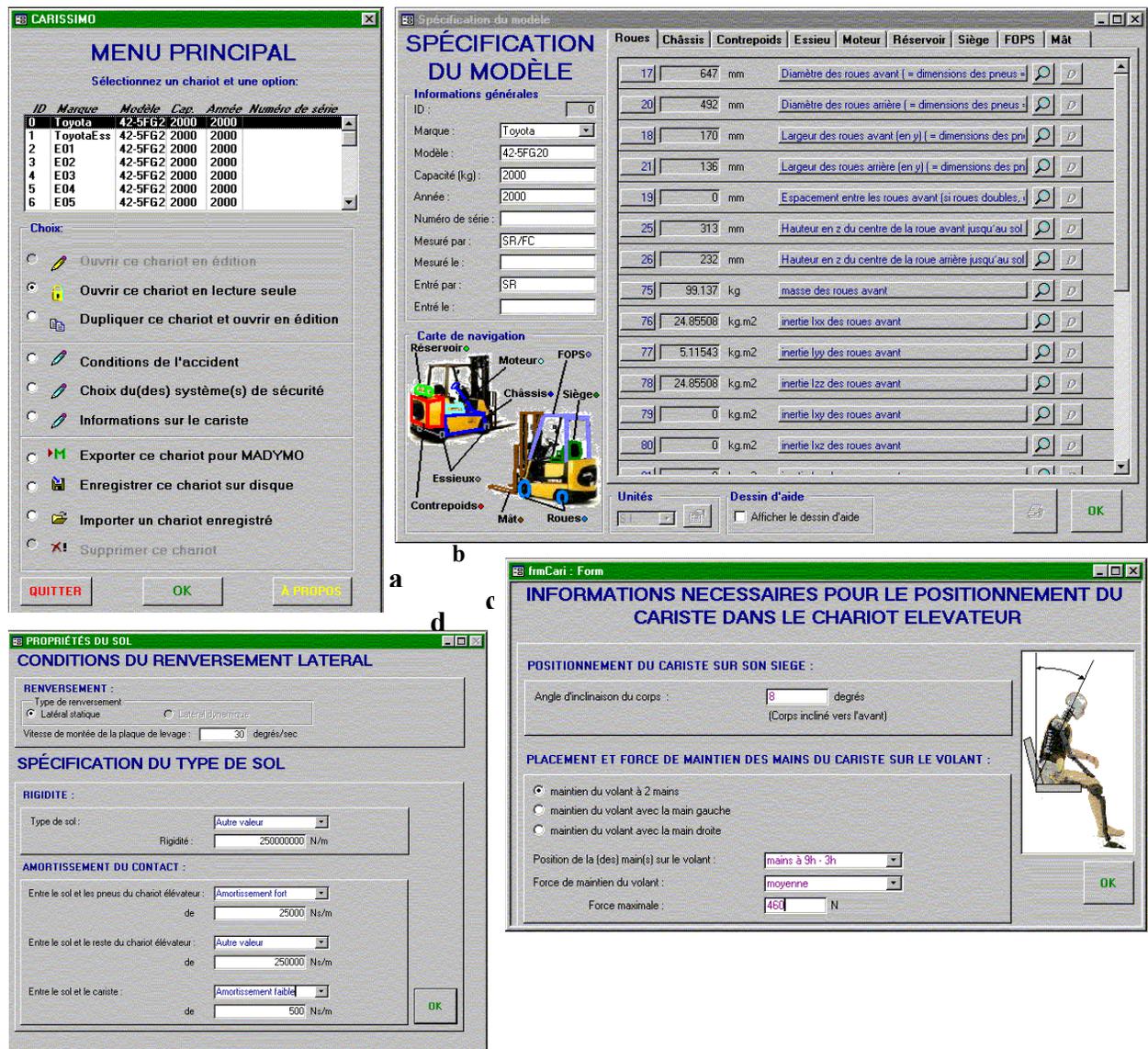


Figure 6 : quelques fenêtres de l'interface CARISSIMO

Cette version de démonstration de CARISSIMO a été montrée à quelques fabricants. La documentation du logiciel sera mise à leur disposition une fois que CARISSIMO sera complété, c'est-à-dire lorsque les modèles mécaniques du chariot élévateur et biomécanique du cariste seront finalisés et validés.

7.5 *Évaluation des modèles*

7.5.1 *Exploitation des modèles*

7.5.1.1 *Simulations statiques*

Dans les prochains paragraphes, seules les simulations testant l'influence de paramètres intrinsèques du chariot et de son siège, du sol, des systèmes de sécurité et du maintien du volant vont être exposées, car ce sont celles qui ont donné les résultats les plus significatifs. D'autres résultats sont disponibles dans les rapports d'étape des annexes 1 et 2. Les résultats présentés ici sont parfois différents des annexes car ils peuvent être plus récents.

En se basant sur une analyse statistique des résultats du plan d'expérience réalisée par *Statistica* on a déterminé que les facteurs significatifs (à plus de 5%) sont la largeur hors-tout (A), la position (B) en z du CG du contrepoids, la largeur (C) des voies arrière et avant. L'effet significatif de ces paramètres A, B et C était prévisible car ces facteurs affectent directement la base de stabilité du chariot, mais dans la pratique, il est souvent impossible de changer ces valeurs à cause de restrictions sur la largeur des allées et sur la manœuvrabilité du chariot élévateur. Ces paramètres sont cependant des variables très importantes du modèle de chariot élévateur à saisir avec CARISSIMO, puisque tous les chariots n'ont pas la même largeur hors-tout, position en z du CG du contrepoids et largeur des voies avant et arrière. La position en z du CG du contrepoids a aussi une grande influence (environ 50% de l'influence de A) sur la stabilité du chariot, puisque le centre de gravité du contrepoids est élevé par rapport au châssis.

Pour l'influence du siège, en se basant sur une analyse statistique des résultats du plan d'expérience avec *Statistica* [4], il fut possible de déterminer qu'aucun facteur n'est significatif à 5% avec les modalités utilisées.

Le test de l'influence du sol donne les résultats donnés au tableau 7. Les conditions sont :

- Simulations statiques à 30°/s,
- véhicule muni de pneus superélastiques,
- conducteur tenu par une ceinture de sécurité abdominale et des accoudoirs,
- maintien du volant à 2 mains (6 degrés de liberté par main) avec une force moyenne de préhension,
- siège en mousse de 65 lb/po².

Tableau 7 : résultats de l'influence de la raideur du sol

	statique		
	(a)	(b)	(c)
Critère HIC	3561	3368	3499
Accélération max. résultante de la tête (m/s ²)	4226	4146	4112
Accélération max. résultante du haut du torse (m/s ²)	864	851	826
Accélération max. résultante du bas du torse (m/s ²)	252	324	314
Vitesse max. résultante de la tête (m/s)	4.15	4.16	4.15
Vitesse max. résultante du haut du torse (m/s)	3.50	3.49	3.49
Vitesse max. résultante du bas du torse (m/s)	2.93	2.92	2.92

(a) $K_{\text{sol}}=25$ MN/m (graviers compactés); (b) $K_{\text{sol}}=100$ MN/m (asphalte); (c) $K_{\text{sol}}=200$ MN/m (asphalte).

Les résultats du critère HIC et de l'accélération de la tête et du torse sont très élevés dans tous les cas, et le HIC est toujours supérieur à 1000. Ainsi, tous les paramètres évalués ne changent quasiment pas. La plage de raideur du sol étudiée, sur lequel circulent habituellement les chariots, ne semble donc pas influencer la gravité des traumatismes du cariste lors du renversement latéral.

Le test de l'influence des systèmes de sécurité donne les résultats donnés au tableau 8. Les conditions sont :

- Simulations statiques à 30°/s,
- véhicule muni de pneus superélastiques,
- sol en asphalte,
- maintien du volant à 2 mains (6 degrés de liberté par main) avec une force moyenne de préhension,
- siège en mousse de 65 lb/po².

Tableau 8 : résultats de l'influence des systèmes de sécurité en statique

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)
Critère HIC	*	4078	2854	4702	81	3368	**	82
Accélération max. résultante de la tête (m/s ²)	84	4415	3802	4696	536	4146	151	553
Accélération max. résultante du haut du torse (m/s ²)	219	835	716	809	192	851	383	271
Accélération max. résultante du bas du torse (m/s ²)	485	241	142	173	211	324	205	162
Vitesse max. résultante de la tête (m/s)	3.59	4.16	3.75	4.37	4.27	4.16	4.39	4.11
Vitesse max. résultante du haut du torse (m/s)	3.55	3.49	3.78	3.85	3.75	3.49	3.58	3.49
Vitesse max. résultante du bas du torse (m/s)	3.79	2.92	3.57	3.38	3.19	2.92	2.89	2.93

(a) aucun système de sécurité; (b) ceinture; (c) accoudoirs; (d) maintien des épaules; (e) portes; (f) ceinture + accoudoirs; (g) ceinture + maintien des épaules; (h) ceinture + portes.

* conducteur éjecté du chariot et écrasé par le FOPS

** conducteur ne touchant pas le sol avec la tête

Tous les paramètres mesurés (HIC, accélérations, vitesses) présentés dans le tableau 8 sont sensibles au changement de systèmes de sécurité. Plus particulièrement, il ressort dans le cas de renversement statique que le système de maintien des épaules avec ceinture et les portes latérales, associés ou non à une ceinture de sécurité abdominale, sont les systèmes de protection les plus prometteurs. Le cas sans système de sécurité ainsi que ceux avec maintien latéral des hanches (accoudoirs) avec ou sans ceinture et le cas avec la ceinture seule semblent être les plus dangereux pour le cariste. Dans le cas sans ceinture, le cariste se fait très souvent éjecter de son siège et se fait écraser au niveau du cou par la structure de sécurité lorsque le chariot frappe le sol. Cette partie de la modélisation est au moins similaire à ce qui se passe lors d'accidents industriels. Ces résultats sont à titre indicatif seulement car les modèles du chariot, du cariste et des systèmes de sécurité devront d'abord être validés expérimentalement avant de pouvoir affirmer l'efficacité des systèmes de protection du cariste. De plus, il faut souligner que le renversement statique ne représente qu'une condition particulière du renversement latéral d'un chariot.

Les deux figures suivantes illustrent la position du cariste à un même moment du renversement ($t = 1.55$ s) dans deux cas. La figure 7 montre le cariste qui est éjecté du véhicule, car il n'y a pas de système de sécurité et son cou sera coincé sous la structure de sécurité (FOPS). La figure 8 montre le cariste qui utilise un système de maintien des épaules et une ceinture abdominale. Dans ce cas, le cariste est mieux retenu et a encore la force de se retenir au volant.

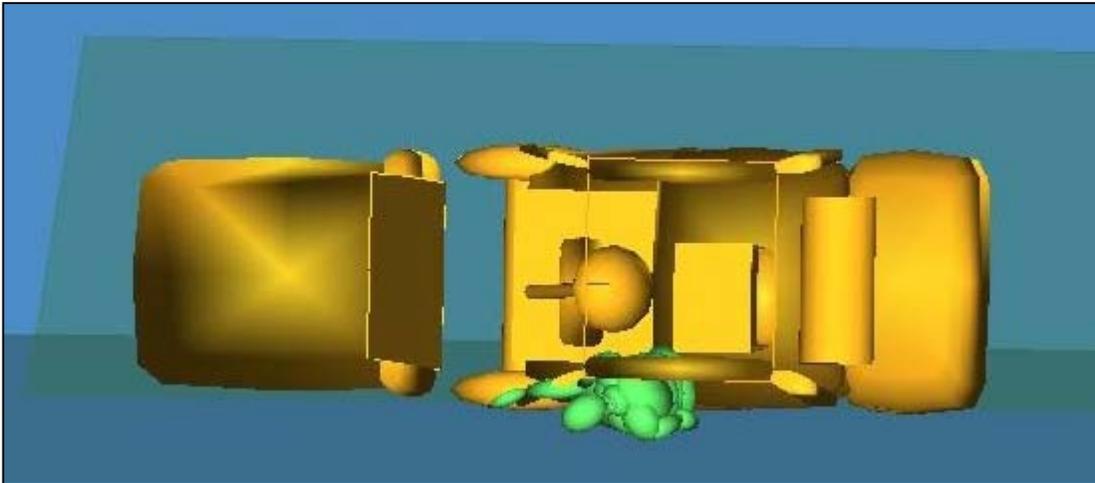


Figure 7 : cas du renversement latéral sans système de sécurité (juste avant l'impact du chariot au sol)

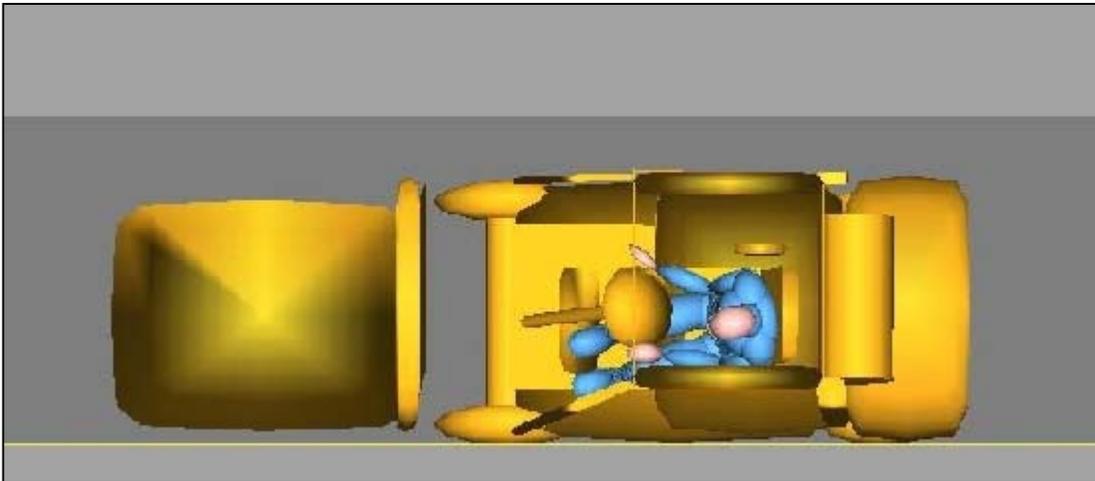


Figure 8 : cas du renversement latéral avec système de maintien des épaules (juste avant l'impact du chariot au sol)

Le test de l'influence du maintien du volant donne les résultats illustrés au tableau 9. Les conditions sont :

- Simulations statiques à 30°/s,
- véhicule muni de pneus superélastiques,
- sol en asphalte,
- ceinture de sécurité abdominale,
- maintien du volant avec 1 degré de liberté par main,
- siège en mousse de 65 lb/po².

Tableau 9 : résultats de l'influence du maintien du volant en statique

	Faible 1 main Gauche	Moyenne 1 main Gauche	Forte 1 main Gauche	Faible 1 main Droite	Moyenne 1 main Droite	Forte 1 main Droite	Faible 2 mains	Moyenne 2 mains	Forte 2 mains
Critère HIC	2749	3005	2930	2231	2282	2263	1955	3157	3128
Accélération max. rés. de la tête (m/s ²)	3546	3885	3913	3189	3314	3303	3003	3967	4000
Accélération max. rés. du bas du torse (m/s ²)	176	137	136	211	183	185	209	214	209

Ainsi, l'accélération du bas du torse ne change quasiment pas alors que l'accélération et le HIC de la tête sont plus sensibles au changement de maintien du volant. Il semble ressortir de cette étude qu'une raideur de maintien moyenne à forte à deux mains sur le volant est plus dangereuse (HIC supérieur) que n'importe quel autre cas. Le meilleur cas serait de tenir faiblement le volant à deux mains, si la modélisation du contact des mains avec le volant est validée expérimentalement avec le chariot élévateur et cariste. Dans tous ces cas le critère HIC prédit des traumatismes importants et même mortels (HIC = 1000 : seuil de risque d'apparition de lésion cérébrale). On ne peut cependant pas conclure que l'effet sera le même avec d'autres combinaisons de systèmes de sécurité.

7.5.1.2 Simulations dynamiques

Dans les prochains paragraphes, seules les simulations testant l'influence du rayon de virage et des systèmes de sécurité vont être exposées, car ce sont les résultats les plus significatifs. Tous les autres résultats sont présentés à l'annexe 2. Les résultats présentés ici sont parfois différents de l'annexe 2 car ils peuvent être plus récents.

Le test de l'influence du rayon de virage donne les résultats donnés au tableau 10 et à la figure 9. Les conditions sont :

- véhicule muni de pneus superélastiques,
- sol en asphalte,
- freinage de 0.28 à 0.47g,
- maintien du volant à 2 mains (6 degrés de liberté par main) avec une force moyenne de préhension,
- siège en mousse de 65 lb/po²,

- ceinture de sécurité et accoudoirs.

Tableau 10 : résultats de prise de virage de 4 et 5 m à 20 km/h et freinage de 0.28g

	Freinage 0.28g		Freinage 0.47g	
	Courbe	Courbe	Courbe	Courbe
	R = 4m	R = 5m	R = 4m	R = 5m
Vitesse max. résultante de la tête (m/s)	5.69	1.96	5.46	1.96
Vitesse max. résultante du haut du torse (m/s)	5.29	1.08	4.87	1.08
Vitesse max. résultante du bas du torse (m/s)	4.81	0.74	4.43	0.71
Accélération max. résultante de la tête (m/s ²)	4041	20.4	4345	22.0
Accélération max. résultante du haut du torse (m/s ²)	640	17.9	661	17.9
Accélération max. résultante du bas du torse (m/s ²)	478	13.4	329	13.4
Critère HIC	2801	*	2657	*

* conducteur ne touchant pas le sol avec la tête, *HIC non significatif*.

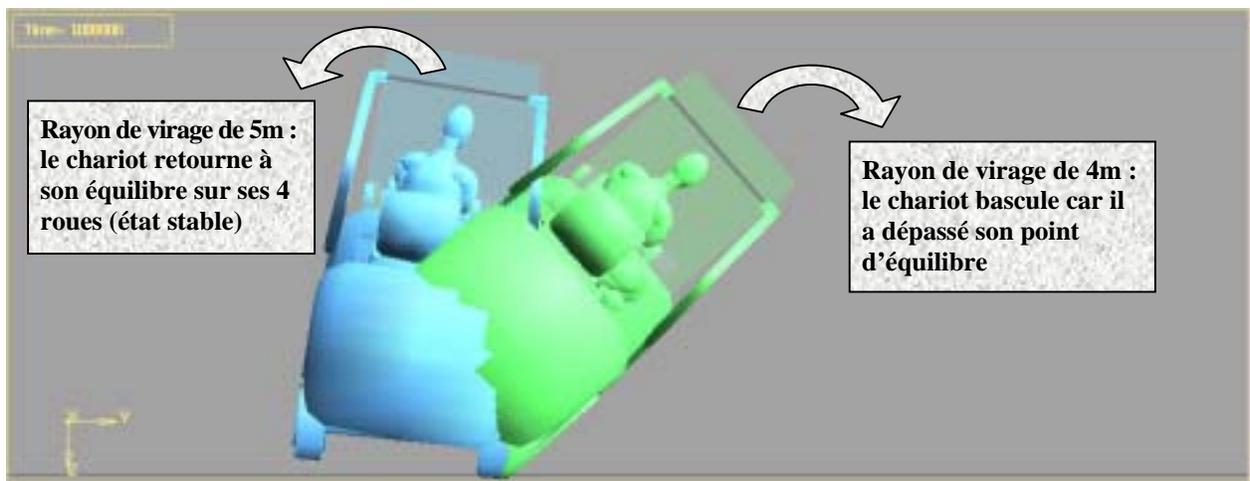


Figure 9 : comparaison d'un virage de 4 et 5 mètres

Nous pouvons remarquer que les résultats sont bien différents puisque dans un virage de 4 mètres le chariot élévateur bascule alors qu'il penche un peu mais revient à sa position d'équilibre dans le cas du virage de 5 mètres (figure 9). Par ailleurs, dans le cas du virage de 4m, la tête du cariste touche le sol et le HIC est plus élevé que la limite de 1000.

Le test de l'influence des systèmes de sécurité donne les résultats donnés au tableau 11. Les conditions sont :

- Simulations dynamiques à 20 km/h avec décélération de 0.28g dans un rayon de 4m,
- véhicule muni de pneus superélastiques,
- sol en asphalte,

- maintien du volant à 2 mains (6 degrés de liberté par main) avec une force moyenne de préhension,
- siège en mousse de 65 lb/po².

Tableau 11 : résultats de l'influence des systèmes de sécurité en dynamique à 20 km/h

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)
Critère HIC	*	1549	7733	2997	1672	2801	**	844
Accélération max. résultante de la tête (m/s ²)	2815	3499	5420	3736	2963	4041	190	1777
Accélération max. résultante du haut du torse (m/s ²)	458	597	1384	1335	576	640	433	457
Accélération max. résultante du bas du torse (m/s ²)	611	896	323	579	221	478	384	177
Vitesse max. résultante de la tête (m/s)	6.63	5.59	6.37	6.45	6.30	5.69	6.22	5.59
Vitesse max. résultante du haut du torse (m/s)	6.83	5.21	5.82	5.89	6.03	5.29	5.55	5.21
Vitesse max. résultante du bas du torse (m/s)	6.91	4.79	5.43	5.50	5.68	4.81	4.84	4.79

(a) aucun système de sécurité; (b) ceinture; (c) accoudoirs; (d) maintien des épaules; (e) portes; (f) ceinture + accoudoirs; (g) ceinture + maintien des épaules; (h) ceinture + portes.

* conducteur éjecté du chariot et écrasé par le FOPS

** conducteur ne touchant pas le sol avec la tête

Le système de retenu utilisé par le cariste a un impact majeur sur les traumatismes subis. Le pire des cas est lorsque le chariot élévateur ne comporte aucun système de sécurité car le cariste se fait écraser par le chariot. Les autres systèmes sont peu performants car le HIC varie de 1672 à 7733, sauf pour la ceinture avec un système de maintien des épaules ou des portes. Mais seul le système de maintien des épaules avec ceinture semble avoir un effet très bénéfique sur les éventuels traumatismes du cariste, car la tête du cariste ne frappe pas le sol. Par contre, la vitesse de la tête est plus élevée que la normale. Ces résultats sont à titre indicatif seulement car les modèles du chariot, du cariste et des systèmes de sécurité devront d'abord être validés expérimentalement avant qu'il soit possible de conclure d'une façon plus absolue de l'efficacité des systèmes de protection du cariste.

7.5.2 *Évaluation préliminaire*

Le tableau 12 compare quelques résultats de nos simulations par rapport à ceux publiés.

Tableau 12 : évaluation préliminaire

		ceinture abdominale et maintien des épaules	ceinture abdominale et accoudoirs	sans système de sécurité
HIC	littérature statique	68 à 897 [4] ; 1815 à 8654 [5-a] ; 52 à 773 [5-c] ; 1461 à 3292 [5-e]	12 à 865 [4]	4 à 64 [5-a] ; 283 à 1787 [5-e] ; 8 à 216 [5-i]
	littérature dynamique	242-682 [4]	34-652 [4]	152 à 1813 [5-i]
	simulations statiques	21 à 32	2987 à 8092	3 à 39
	simulations dynamiques	21 à 24	1936 à 3327	804 à 1217

Accélération maximale de la tête	Littérature statique	246 à 744 g [5-a] ; 33 à 271 g [5-c] ; 412 à 608 g [5-e]	-	5 à 79 g [5-a] ; 214 g [5-c] ; 131 à 452 g [5-e] ; 14 à 130 g [5-i]
	Littérature dynamique	-	-	79 à 342 g [5-i]
	simulations statiques	151 à 183 g	382 à 585 g	84 à 691 g
	simulations dynamiques	157 à 190 g	1 à 482 g	2815 à 2541 g
Temps de renversement statique (CG au-dessus des roues) - littérature - simulations		1.3 s [4] (exp) 1.4 s [4] (simu) 1.0 à 1.5 s [5-e] (exp) Environ 0.8 seconde		
Temps de renversement dynamique depuis décolllement des roues du sol - littérature - simulations		1.05 secondes [5-d] 0.95 seconde		
Temps de renversement dynamique (CG au-dessus des roues) - littérature - simulations		0.4 secondes [4] 0.4 seconde		

Ces quelques comparaisons montrent que les temps de renversement de la modélisation sont très proches des valeurs obtenues de la littérature et les animations semblent assez réalistes. Les accélérations maximales résultantes de la tête sont aussi assez proches de la littérature dans la plupart des cas. Cependant, le HIC est très différent sauf dans le cas sans système de sécurité. Ces différences sont tout d'abord attribuables aux conditions des tests informatiques ou expérimentaux (type de chariot, type de modélisation du cariste, méthodes de tests statiques et dynamiques, etc.) qui ne sont que très peu décrits dans la littérature. Beaucoup de ces paramètres peuvent avoir une influence non négligeable sur les résultats. En effet, comme le montre l'étude [17] et les commentaires donnés au paragraphe 6.5.1, des propriétés du chariot élévateur comme la largeur de voie ou le centre de gravité du contrepoids ont une influence majeure sur le comportement du chariot et donc sur les traumatismes du cariste. Une différence dans les dimensions du chariot seulement peut donc induire des différences importantes au niveau des résultats des simulations. C'est pour cela d'ailleurs que même d'un article de la littérature à l'autre, les résultats varient énormément. Ceci met en évidence l'importance des expérimentations pour valider la modélisation.

Tous les résultats numériques des simulations de ce projet de recherche sont donnés à titre indicatif seulement car ils sont évidemment conditionnels à la validation expérimentale des modèles du chariot, du cariste et des systèmes de sécurité, qui se fera dans une phase ultérieure du projet.

Le seul moyen à notre disposition pour vérifier la fidélité de représentation du renversement est donc dans un premier temps, de faire une évaluation visuelle du comportement dynamique de notre modèle du chariot élévateur et du cariste lors du renversement latéral (qui semble bonne). Dans un deuxième temps, de faire une évaluation des résultats numériques, en comparant les différents cas de simulations entre eux. Et enfin, de proposer une méthode expérimentale de tests pour valider le modèle informatique, ce qui constitue la prochaine étape de ce projet.

7.5.3 Simulations préliminaires pour les validations expérimentales

Ces simulations ont montré qu'aucun des paramètres testés (raideurs des portes entre k et $100*k$, du siège et de la ceinture de sécurité, amortissement et frottement du contact chariot/sol) à l'intérieur des modalités susceptibles d'être rencontrées ne semble avoir une influence suffisante pour nécessiter une caractérisation expérimentale avant les tests avec le chariot et le mannequin.

7.6 Validation expérimentale

La validation expérimentale, essentielle avant l'utilisation du logiciel CARISSIMO pour le design du chariot élévateur ou le design des dispositifs de protection, devra être réalisée au cours de la prochaine phase de ce projet de recherche. Il s'agira alors de faire des évaluations expérimentales à l'aide de chariots élévateurs et de mannequins anthropomorphiques afin de s'assurer de la qualité de nos simulations des renversements latéraux. Une pré-étude basée sur la conception préliminaire de bancs d'essais pour simuler le renversement latéral d'un chariot élévateur [14] a déjà permis de faire ressortir deux solutions possibles à coût raisonnable pour la validation des simulations statiques et dynamiques. Il s'agit d'une plaque de levage montée par des vérins pour le cas statique et d'un rail décrivant un virage que doit suivre le chariot pour le cas dynamique. Pour cela, un protocole de recherche, décrivant en détail les bancs d'essais à mettre en œuvre et le matériel nécessaire, va être proposé à la suite de la présente phase I du projet. L'annexe 3 donne une idée des essais expérimentaux à réaliser et comment les bancs d'essais seront conçus. Ces données sont préliminaires puisque nous sommes en train de définir le protocole pour la phase II du projet. Des changements seront donc possibles quant aux techniques et nombre de tests.

8 Conclusion et perspectives de recherche

La modélisation du chariot élévateur et du cariste pour la simulation du renversement latéral développée dans le cadre de ce projet est très avancée. L'interface conviviale CARISSIMO, qui permet actuellement de saisir la plupart des informations nécessaires aux simulations est fonctionnelle pour les tâches principales et sera complétée au fur et à mesure que les modèles du chariot et du cariste seront améliorés. Tous les résultats numériques des simulations de ce projet de recherche sont donnés à titre indicatif seulement car ils sont évidemment conditionnels à la validation expérimentale des modèles du chariot, du cariste et des systèmes de sécurité, qui se fera dans une phase ultérieure du projet.

Des simulations du renversement latéral statique du chariot élévateur et du cariste pour tester l'influence des paramètres principaux ou évaluer l'influence de systèmes de sécurité et du maintien du volant montrent la bonne fonctionnalité de nos modèles. Ces simulations permettent de voir que de façon générale, la vitesse maximale de la tête ou du corps du cariste sont rarement critiques, mais par contre que l'accélération de la tête et le critère HIC atteignent ou dépassent très souvent des valeurs critiques pour le cariste. Ce sont donc ces deux derniers résultats qui sont les plus importants pour juger de l'influence sur le cariste de systèmes de sécurité. Ainsi, il semble ressortir de ces simulations que seul le maintien des épaules combiné à une ceinture de sécurité abdominale avec un maintien assez lâche du volant à deux mains est la situation la plus prometteuse du point de vue sécurité.

Les simulations du renversement latéral dynamique du chariot élévateur et du cariste réalisées pour tester deux rayons de virage, plusieurs systèmes de sécurité et le maintien du volant permettent de constater que la modélisation fonctionne bien et qu'elle est cohérente. Le chariot bascule dans un virage de 4m tandis qu'il retrouve son équilibre pour un rayon de 5m. Comme dans le cas statique, l'utilisation d'une ceinture de sécurité abdominale et du maintien des épaules en tenant le volant à deux mains semble la meilleure solution, comparativement au cas avec ceinture de sécurité abdominale et accoudoirs ou au cas sans système de sécurité. L'efficacité de l'utilisation des portes semble beaucoup plus aléatoire puisque dans les cas statiques elles sont efficaces, mais plus du tout lorsque les conditions s'apparentent plus à un renversement dynamique.

Une première comparaison de nos résultats avec la littérature a été faite. Des résultats sont différents, toutefois il faut faire très attention lors de cette comparaison avec la littérature puisque les résultats publiés ne sont pas tous fiables, et les modèles et conditions de tests sont souvent différents et mal définis. Par contre, les temps de renversement et l'animation des renversements latéraux sont assez similaires et certainement les plus faciles à vérifier, mais ne donnent pas ou peu d'information sur le comportement du cariste et ses traumatismes lors d'un renversement.

Les fabricants rencontrés considèrent le projet intéressant et à ce point-ci sont prêts à collaborer à son développement futur. D'autres fabricants seront rencontrés d'ici peu, puisque le projet est maintenant plus avancé et concret et donc plus attrayant, afin de leur proposer l'utilisation de CARISSIMO comme outil de design.

La prochaine étape du projet est maintenant de valider expérimentalement le comportement du chariot élévateur et son interface avec le cariste. Pour cela, une première série de tests (informatiques) d'influence a déjà été réalisée pour évaluer quels sont les paramètres du modèle qu'il faudrait éventuellement mieux définir. Aucun ne semble avoir une influence suffisante pour caractériser ces paramètres, dans les limites des conditions de tests. Cependant, il faudra approfondir ces tests d'influence pour être sûr de tenir compte correctement de plusieurs paramètres du modèle, comme le maintien du volant à une ou deux mains, plus ou moins fortement. Les fabricants pourront eux-mêmes reprendre ces tests s'ils le souhaitent. Les tests expérimentaux consisteront alors à valider le modèle durant un renversement latéral statique et dynamique. Les données expérimentales permettront aussi d'ajuster la modélisation dans MADYMO si nécessaire afin d'avoir finalement un modèle fiable, représentatif de la réalité qui pourra alors servir à améliorer la sécurité des caristes. Éventuellement, d'autres systèmes de sécurité plus perfectionnés pourraient être testés, comme une ceinture de sécurité définie par éléments finis ou des coussins gonflables. Finalement, des rencontres seront tenues avec des fabricants afin de présenter et expliquer la version finale de CARISSIMO.

9 Communications et rayonnement

- Koutchouk M, Aubin CÉ, Benoît R, Olteanu M, Gou M. Modeling of lift truck and driver to simulate lateral tipover. Multibody system dynamics (en preparation).

- Koutchouk M, Gou M, Aubin CÉ, Olteanu M, Benoît R. Safety systems comparison to improve driver's safety during lift truck lateral tipover. SAE Digital human modeling for design and engineering conference and exhibition, juin 2002 (en preparation).
- Koutchouk M, Aubin CÉ, Gou M, Olteanu M, Benoît R. Simulation du renversement latéral d'un chariot élévateur pour améliorer la sécurité du cariste. Congrès conjoint de la société de biomécanique et de la société canadienne de biomécanique, Montréal (Canada), 23-26 août 2000.
- Côté F. Modélisation biomécanique de l'interface siège-cariste lors du renversement latéral d'un chariot élévateur. Projet de fin d'étude à l'École Polytechnique de Montréal - génie mécanique, 1999.
- Riendeau S. Étude de sensibilité des paramètres impliqués dans le renversement latéral d'un chariot élévateur. Projet de fin d'étude à l'École Polytechnique de Montréal - génie mécanique, 1999.
- Koutchouk M, Aubin CÉ, Gou M, Olteanu M, Benoît R. Modélisation biomécanique d'un cariste pour la simulation du renversement latéral d'un chariot élévateur. XXIV^e congrès de la Société de biomécanique, Beaune (France), 15-17 septembre 1999
- Koutchouk M, Aubin CÉ, Gou M, Benoît R. Étude de faisabilité sur le développement d'un modèle informatique de simulation des renversements latéraux des chariots élévateurs en vue d'améliorer la sécurité des caristes. Rapport interne IRSST, 1998.
- Koutchouk M., Aubin CÉ, Gou M, Benoît R. Modélisation de chariots élévateurs en vue d'améliorer la sécurité des conducteurs lors de renversements latéraux. Prix d'excellence du concours étudiant de publication de la revue Travail et Santé. Travail et Santé 14 : 4, S24-27 – 1998.
- Guy L. Conception d'un banc d'essai pour simuler le renversement d'un chariot élévateur. Projet de fin d'études à l'École Polytechnique de Montréal - génie mécanique, 1998.
- Koutchouk M. Modélisation cinématique du renversement latéral d'un chariot élévateur : Étude de faisabilité. Rapport de maîtrise en ingénierie. Département de génie mécanique de l'École Polytechnique de Montréal. 1997.

10 Références

- [1] Duquette, J. et Benoit, R. (1997) Les renversements latéraux de chariot élévateur : bilan des études sur les systèmes de protection de l'opérateur et recommandations pour une nouvelle approche. Document IRSST. ISBN 2-551-18863-6. ISSN 0820-8395.

- [2] Tellier, C. (1995) Analyse sommaire des accidents graves et mortels provenant de la banque VREN de la CSST de 1974 à 1994. IRSST, document de travail non publié.

- [3] Tellier, C. (1995) Sommaire des accidents de chariots élévateurs répertoriés par la CSST de 1991 à 1994. IRSST, document de travail non publié.

- [4] Johnson J. (1988). Operator restraint development : reduction of operator injuries from lift truck tipover and loading dock incidents. Hyster company, engineering test report B-85-33.

- [5] Triodyne consulting engineers and scientists (1994). Seat belt for forklift trucks. Triodyne Inc, bibliography series 924, parts I, II and III.
 - a) Alem N.M. (1985). Effects of seatwings and seatbelts on the response of forklift truck operator during lateral dynamic tipovers. Final technical report. Ann Harbor, the University of Michigan transportation Institute.
 - b) Benson J.B., Melvin, J.W., Snider R.G. (1983). Evaluation of the upgraded heavy equipment operator's safety belt restraint system. Final report. Ann Harbor, The University of Michigan Transportation Research Institute (UMTRI).
 - c) Entwistle, F. et al. (1983) Operator Restraint for the lift truck. A compendium done for the Clark Equipment Company, Industrial Truck Division.
 - d) IASS (Institute for Advanced Safety Studies, Niles. IL) (1986). Dynamic forklift truck tip-overs: a preliminary safety analysis and testing program of operator restraint systems. Prepared for Allis-Chalmer, Industrial Truck Division.
 - e) IASS (Institute for Advanced Safety Studies, Niles. IL) (1986). Effects of operator restraint on measured head impacts during lateral overturns of forklift trucks. Prepared for Allis-Chalmer, Industrial Truck Division.

- f) IASS (Institute for Advanced Safety Studies, Niles. IL) (1985). An examination of seat belt acceptance by forklift truck operators. Prepared for Allis-Chalmer, Industrial Truck Division.
- g) IASS (Institute for Advanced Safety Studies, Niles. IL) (1985). Maneuver analysis : a safety program for forklift truck operator protection. Prepared for Allis-Chalmer, Industrial Truck Division.
- h) IASS (Institute for Advanced Safety Studies, Niles. IL) (1985). Preliminary report on tip-over experiences of forklift truck operators. Prepared for Allis-Chalmer, Industrial Truck Division.
- i) King, A.I. (1981). Operator restraint test program. Final report to the Industrial Truck Association. Southfield, MI, Albert I. King, Inc
- j) Melvin J.W., Alem N.M. et Winkler C.B. (1982). Operator restraint test program – Phase II – Final report. University of Michigan, Highway Safety Research Institute.
- k) Melvin J.W., Alem N.M. et Winkler C.B. (1982). Operator restraint test program – Phase II – Appendices – Final report. University of Michigan, Highway Safety Research Institute.
- l) McCarthy R.L., Taylor R.K., Finnegan J.P. et Krumm-Scott S. (1982). Review of occupant restraint effectiveness and its application to lift trucks. FAA-82-4-4. Failure Analysis Associates, Palo Alto, CA.
- [6] Entwisle, H.F., Moffatt, E.A. (1992) Lift truck overturn safety. ASME 92-WA/SAF-1.
- [7] Dino, G.L. (1983) Operator restraint for the lift truck – a compendium. Clark equipment company, Industrial Truck Division, 21-31.
- [8] Tenton, J. (1996) Handbook of vehicle design analysis. Society of Automotive Engineers.
- [9] Ford engineering world (Dec. 1996) Ford motor Co., Rearborn, Michigan. Vol. 21 no. 3.
- [10] Johnson J. (1988). Operator restraint development : reduction of operator injuries from lift truck tipover and loading dock incidents – video. Hyster company, engineering test report B-85-33.
- [11] (1999). Logiciel MADYMO version 5.4, TNO, Delft, Holland.

- [12] Koutchouk M., Aubin C.É., Gou M., Benoît R. (1998). Étude de faisabilité sur le développement d'un modèle informatique de simulation des renversements latéraux des chariots élévateurs en vue d'améliorer la sécurité des caristes. Rapport interne IRSST.

- [13] Koutchouk, M. (1997) Modélisation cinématique du renversement latéral d'un chariot élévateur : Étude de faisabilité. Rapport de maîtrise en ingénierie. Département de génie mécanique de l'École Polytechnique de Montréal.

- [14] Guy L. (1998). Conception d'un banc d'essai pour simuler le renversement d'un chariot élévateur. Projet de fin d'études à l'École Polytechnique de Montréal – génie mécanique.

- [15] SAE (1995). Heavy truck crashworthiness. SAE Cooperative Research Report CRP-9.

- [16] Meyerholf G.G. (1963). Preliminary Benkelman tests results and their application in pavements design. Comptes-rendus, conférence de l'association canadienne des bonnes routes, Québec.

- [17] Riendeau S. (1999). Étude de sensibilité des paramètres impliqués dans le renversement latéral d'un chariot élévateur. Projet de fin d'étude à l'École Polytechnique de Montréal - génie mécanique.

- [18] Côté F. (1999). Modélisation biomécanique de l'interface siège-cariste lors du renversement latéral d'un chariot élévateur. Projet de fin d'étude à l'École Polytechnique de Montréal - génie mécanique.