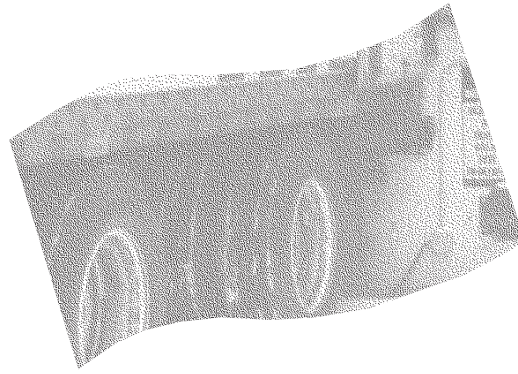


Développement d'un outil
d'évaluation des mesures
de retenue des camions
aux quais de transbordement

Étude du basculement
d'une semi-remorque



ÉTUDES ET RECHERCHES

François Gauthier
Laurent Giraud
Réal Bourbonnière
Sylvain Bournival

Jean-Guy Richard
Renaud Daigle
Serge Massé

RA6-381

ANNEXE





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 : 1-877-221-7046

Dépôt légal
Bibliothèque nationale du Québec
2004

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,
octobre 2004

Développement d'un outil
d'évaluation des mesures
de retenue des camions
aux quais de transbordement

Étude du basculement d'une semi-remorque

François Gauthier, ing.¹, Laurent Giraud, ing. stag.², Réal Bourbonnière, ing.²,
Sylvain Bournival, ing. jr.¹, Jean-Guy Richard, docteur-ingénieur³, Renaud Daigle, tech.² et Serge Massé, ing.²

¹Département de génie industriel, École d'ingénierie, UQTR,

²Sécurité-ingénierie, IRSST

³Sécurité-ergonomie, IRSST

ÉTUDES ET
RECHERCHES

ANNEXE F

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca



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

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs.

1 ÉLABORATION DU MODÈLE

1.1 Équation de base

Soit une semi-remorque ayant une masse $M1$ et un chariot élévateur ayant une masse $M2$. Nous considérons ici le basculement de la semi-remorque autour de la base des béquilles (point O). Le chariot, en freinant (ou en accélérant pour reculer), génère une force en fonction de sa décélération (ou accélération). L'ensemble semi-remorque et chariot bascule si la réaction aux roues N est inférieure à zéro.

Si on considère la somme des moments autour du point « O » (voir figure 1):

$$\Sigma Mo = 0 = M1 \times d1 - M2 \times d2 + F_{\text{freinage}} \times Y - N \times d3$$

où : $M1$ = masse de la semi-remorque

$M2$ = masse du chariot

N = force de réaction au sol sous les roues

D'où,

$$N = (M1 \times d1 - M2 \times d2 + M2 \times \text{acc} \times Y) / d3$$

Si la réaction aux roues « N » est négative, cela signifie que la semi-remorque est instable. Il y a donc basculement ou début de basculement de la semi-remorque. Si la réaction aux roues « N » est positive, cela signifie que la semi-remorque est stable.

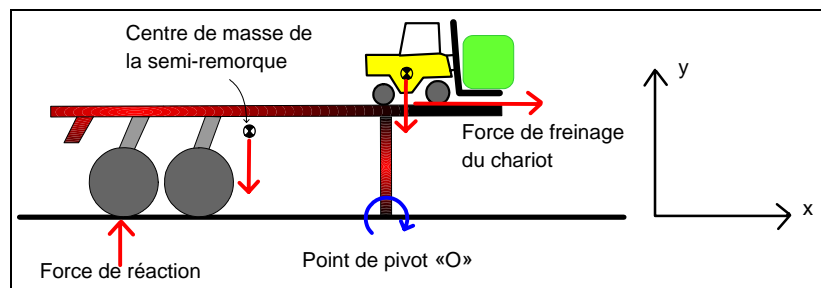


Figure 1. Schéma des forces en jeu

1.2 Définition des variables d'entrées utilisées

1.2.1 Semi-remorque

Soit une semi-remorque dont les variables sont résumées au tableau 1.

Tableau 1
Variables de la semi-remorque

Variable	Définition	Unités
LIFTMU	Coefficient de friction correspondant au type de plancher de la semi-remorque	Aucune
h	Hauteur du plancher de la semi-remorque	m
Lt	Longueur totale de la semi-remorque	m
d	Distance entre les essieux de la semi-remorque	m
e	Position de l'essieu arrière par rapport à l'arrière de la semi-remorque	m
b	Position de la béquille par rapport à l'essieu arrière de la semi-remorque	m
M1	Masse totale de la semi-remorque vide	Kg
X1	Position du centre de gravité en X de la semi-remorque vide par rapport à l'essieu arrière de celle-ci	m
Y1	Position du centre de gravité en Y de la semi-remorque vide par rapport au sol	m
k	Constante de ressort de la suspension (pour un essieu)	N/m
c	Constante d'amortissement de la suspension (pour un essieu)	N *sec/m
Nes	Nombre d'essieux sur la semi-remorque	Aucune

1.2.2 Chariot élévateur

Soit un chariot élévateur standard à deux essieux et quatre roues avec fourches à l'avant dont les paramètres sont définis au tableau 2.

Tableau 2
Variables du chariot élévateur

Variable	Définition	Unités
LIFTCAP	Capacité du chariot	Kg
V	Vitesse maximale du chariot élévateur en charge	m/sec
LIFTW	Masse du chariot élévateur vide (sans marchandises)	Kg
LIFTCGLOAD	Position du centre de gravité de la charge en X à partir des roues avant du chariot	m
LIFTCGLOADY	Position du centre de gravité de la charge en Y à partir du sol	m
LIFTC	Longueur des fourches à partir des roues avant du chariot	m
LIFTCGX0	Position du centre de gravité du chariot vide à partir des roues avant du chariot	m
LIFTCGY0	Position du centre de gravité en Y du chariot vide à partir du sol	m
LIFTSTOP	Position d'arrêt du chariot sur la semi-remorque à partir de l'essieu arrière de la semi-remorque	m

1.2.3 Quai de transbordement

Le tableau 3 résume les variables utilisées pour décrire le quai de transbordement.

Tableau 3
Variable du quai de transbordement

Variable	Définition	Unités
Muz	Coefficient de friction entre pneus de la semi-remorque et le sol (en fonction du type de revêtement et des conditions au sol)	aucune
Mu1	Coefficient de friction entre les pattes de la béquille et le sol (en fonction du type de revêtement et des conditions au sol)	aucune
Teta	Pente de l'accès au quai (positif : pente vers l'extérieur, négatif : pente vers le quai)	Pourcentage (%)

1.2.4 Charge de la semi-remorque

Les trois variables définies au tableau 4 sont utilisées pour modéliser la marchandise déjà présente dans la semi-remorque.

Tableau 4
Variables des marchandises

Variable	Définition	Unités
Charge	Masse de la marchandise dans la semi-remorque	Kg
X3	Position du centre de gravité de la charge en X à partir de l'essieu arrière de la semi-remorque	m
Y3	Position du centre de gravité de la charge en Y à partir du plancher de la semi-remorque	m
Ce	Encombrement de la charge à partir du fond de la semi-remorque	m

1.3 Position maximum du chariot dans la semi-remorque

On détermine la position maximum du centre de gravité du chariot dans la semi-remorque en fonction des dimensions du chariot et de l'encombrement généré par la marchandise au fond de la semi-remorque.

Soit M_2 , la masse totale du chariot et sa charge ;

$$M_2 = \text{liftcap} + \text{liftw}$$

La position du centre de gravité en X du chariot avec sa charge est calculé ainsi;

$$Liftcgx = (liftw * liftcgx0 + liftcap * liftcload) / M2$$

La position du centre de gravité en Y à partir du plancher du chariot avec sa charge est calculé ainsi ;

$$Liftcgy = (liftcgy0 * liftw + liftcloady * liftcap) / M2$$

D'où on déduit;

$$Y2 = liftcgy + h$$

Dans le cas du basculement, la position maximale du chariot est la variable liftstop;

$$Liftstop = Lt - e - Ce - liftc - liftcgx$$

1.4 Force horizontale générée par la décélération du chariot

Dans le cas présent, on considère une distance de freinage universelle fonction de la décélération maximale du chariot à sa vitesse maximale. Soit S la distance de freinage à pleine capacité.

$$a = V^2 / 2S$$

D'où,

$$S = V^2 / 2a$$

Où V est la vitesse avant freinage et a est la décélération du chariot. L'équation de l'accélération en fonction de la force est ;

$$F = m a$$

$$a = F / m$$

Où F est la force de décélération et M est la masse du chariot. En combinant les deux équations ;

$$S = M V^2 / 2 F$$

On obtient donc l'équation suivante;

$$S = M2 * V^2 / 2 * Fmax * 9.81$$

La force de freinage maximale est déterminée en fonction de la force de friction statique que peut prendre le chariot en freinant sur le plancher de la semi-remorque.

Cette force équivaut à ;

$$F_{max} = M2 * \text{liftmu} * \text{Cos}(teta)$$

Où liftmu est le coefficient de friction entre les pneus du chariot et le plancher de la semi-remorque. Lorsque la vitesse du chariot est diminué d'un certain pourcentage (pvit), on considère que la distance de freinage est la même que celle obtenue à pleine vitesse.

$$F_{freinage} = M2 (V * \text{pvit})^2 / 2 S$$

$$F_{freinage} = M2 (V \text{pvit})^2 2 F_{max} / 2 M2 V^2$$

$$F_{freinage} = \text{pvit}^2 F_{max}$$

Ce qui signifie que la force de freinage générée à un pourcentage de la vitesse maximale « pvit » est le produit de la force maximale de freinage à pleine vitesse et le carré de « pvit ».

$$F_{freinage} = F_{max} \text{pvit}^2$$

En combinant;

$$F_{freinage} = M2 * \text{liftmu} * \text{cos}(teta) * \text{pvit}^2$$

1.5 Calcul de la réaction aux pneus Nz

La réaction aux essieux est calculée pour avoir une idée de «l'intensité» du basculement, en réalité seul le signe (positif ou négatif) est utile pour le problème actuel. Si la semi-remorque possède plus d'un essieu, le problème devient hyperstatique, et des simplifications devront donc être apportées pour le résoudre simplement.

Nz est la réaction sur un essieu de semi-remorque. Pour une semi-remorque à un essieu, la distance considérée pour le calcul du moment est b. Pour une semi-remorque à deux essieux, la distance est (2b-d). Pour une semi-remorque à « Nes » essieux la distance est ;

$$\text{Distance à considérer} = Nes b - d (Nes / 2) (Nes - 1)$$

Les bras de levier pour chaque masse sont égaux à ;

$$\text{Levier 1} = X1 - b + Y1 \text{ Tan } \theta$$

$$\text{Levier 2} = \text{liftstop} - b + Y2 \text{ Tan } \theta$$

$$\text{Levier pour force de freinage} = Y2$$

$$\text{Levier pour marchandise (Levier 3)} = X3 - b + Y3 \text{ Tan } \theta$$

En considérant une semi-remorque sur une pente on peut déduire l'équation suivante ;

$$Nz = \frac{(- M1 (\text{Levier1}) - M2 (\text{Levier 2}) - \text{Charge} (\text{Levier 3})) \text{Cos } \theta - F_{freinage} Y2}{Nes b - d (Nes / 2) (Nes - 1)}$$

D'où on peut tirer la réaction, N_z , pour un essieu. Si la réaction est inférieure à zéro, la semi-remorque bascule.

1.6 Efforts repris par la barre anti-encastrement

Lorsque la semi-remorque n'est plus appuyée sur ses roues, elle est en déséquilibre. Si l'on considère que la barre anti-encastrement est capable de retenir la semi-remorque dans un tel cas, nous devons donc calculer la réaction contre le basculement à la barre anti-encastrement. Cette réaction est définie par la somme des moments suivants;

$$M_o = 0 = -N_z (Nes b - d (Nes/2) (Nes-1)) - anti-encastrementY (e + b)$$

D'où on trouve,

$$anti-encastrementY = \frac{-N_z (Nes b - d (Nes/2) (Nes-1))}{(e + b)}$$

Dans le cas où N_z est inférieur à zéro.

2 RECHERCHE DE DONNÉES

2.1 Données sur les semi-remorques

Une recherche a été effectuée auprès de trois compagnies fabriquant des semi-remorques de type fourgon. Les compagnies sont Lufkin, Manac, et Stoughton. Selon les informations recueillies, les fabricant offrent à peu près tous le même type de semi-remorque et les propriétés de poids et de dimensions sont sensiblement les mêmes d'une compagnie à l'autre. C'est pourquoi une semi-remorque Manac a été choisie comme modèle de base. Le modèle est une semi-remorque de 53 pieds avec deux essieux. Mme Josée Lessard, ingénieure chez Manac, nous a fournies les valeurs nécessaires pour pouvoir modéliser d'autres types de semi-remorques.

- Poids approximatif d'un ensemble d'essieux tandem : 4200 lbs
- Poids approximatif d'un essieu supplémentaire : 2000 lbs
- Poids approximatif d'un ensemble d'essieu simple : 2200 lbs
- Semi-remorque de 53 pieds sans essieu (seulement le fourgon) : 10250 lbs
- La position du centre de gravité d'un fourgon sans essieu est approximativement au centre de ce dernier.

Avec ces données, cinq types de semi-remorques ont été créés pour les modélisations :

- 53 pieds 2 essieux tableau 5
- 53 pieds 3 essieux tableau 6
- 48 pieds 4 essieux tableau 7
- 45 pieds 2 essieux tableau 8
- 32 pieds 1 essieu tableau 9

2.1.1 Semi-remorque 53 pieds 2 essieux

Tableau 5

Valeurs utilisées pour définir une semi-remorque de 53 pieds et 2 essieux

Variable	Définition	Valeur
h	Hauteur de la plate-forme	1.37 m
Lt	Longueur totale de la semi-remorque	16.15 m
d	Distance entre les essieux de la semi-remorque	1.25 m
e	Position de l'essieu arrière par rapport à l'arrière de la semi-remorque	2.15 m
b	Position de la béquille par rapport à l'essieu arrière de la semi-remorque	10.35 m
M1	Masse totale de la semi-remorque vide	6575 Kg
X1	Position du centre de gravité en X de la semi-remorque vide par rapport à l'essieu arrière de celle-ci	4.37 m
Y1	Position du centre de gravité en Y de la semi-remorque vide par rapport au sol	1.05 m
Nes	Nombre d'essieux sur la semi-remorque	2

2.1.2 Semi-remorque 53 pieds 3 essieux

Tableau 6

Valeurs utilisées pour définir une semi-remorque de 53 pieds et 3 essieux

Variable	Définition	Valeur
h	Hauteur de la plate-forme	1.37 m
Lt	Longueur totale de la semi-remorque	16.15 m
d	Distance entre les essieux de la semi-remorque	1.25 m
e	Position de l'essieu arrière par rapport à l'arrière de la semi-remorque	1.52 m
b	Position de la béquille par rapport à l'essieu arrière de la semi-remorque	10.98 m
M1	Masse totale de la semi-remorque vide	7498 Kg
X1	Position du centre de gravité en X de la semi-remorque vide par rapport à l'essieu arrière de celle-ci	4.55 m
Y1	Position du centre de gravité en Y de la semi-remorque vide par rapport au sol	1.05 m
Nes	Nombre d'essieux sur la semi-remorque	3

Détail des calculs

- Évaluation du poids du fourgon : 4666 kg
- Poids de l'ensemble des trois essieux : 2818 kg
- Poids total de la semi-remorque = 2818 kg + 4666 kg = 7498 kg
- Position du CG du fourgon = $Lt / 2 = 16.15 \text{ m} / 2 = 8.08 \text{ m}$
- Position du CG de l'ensemble des essieux = $d + e = 1.25 \text{ m} + 1.52 \text{ m} = 2.77 \text{ m}$

$$CG = \frac{4666 \times 8.08 + 2818 \times 2.77}{(4666 + 2818)}$$

CG = 6.07 m à partir de l'arrière de la semi-remorque
 À partir de l'essieu arrière = $6.07 \text{ m} - 1.52 \text{ m} = 4.55 \text{ m}$

2.1.3 Semi-remorque 48 pieds 4 essieux

Tableau 7

Valeurs utilisées pour définir une semi-remorque de 48 pieds et 4 essieux

Variable	Définition	Valeur
h	Hauteur de la plate-forme	1.37 m
Lt	Longueur totale de la semi-remorque	14.63 m
d	Distance entre les essieux de la semi-remorque	1.25 m
e	Position de l'essieu arrière par rapport à l'arrière de la semi-	0.76 m

	remorque	
b	Position de la béquille par rapport à l'essieu arrière de la semi-remorque	10.2 m
M1	Masse totale de la semi-remorque vide	7954 Kg
X1	Position du centre de gravité en X de la semi-remorque vide par rapport à l'essieu arrière de celle-ci	4.66 m
Y1	Position du centre de gravité en Y de la semi-remorque vide par rapport au sol	1.05 m
Nes	Nombre d'essieux sur la semi-remorque	4

Détail des calculs

- Évaluation du poids du fourgon = $4666 \text{ kg} \times (48/53) = 4226 \text{ kg}$
- Poids de l'ensemble des trois essieux : 2818 kg
- Poids de l'essieu supplémentaire : 1000 kg
- Masse totale de la semi-remorque = $1000 + 2818 + 4226 = 7954 \text{ kg}$
- Position du CG du fourgon = $Lt / 2 = 14.63 \text{ m} / 2 = 7.32 \text{ m}$
- Position du CG de l'ensemble des essieux = $d + e = 1.25 \text{ m} + 0.76 \text{ m} = 2.01 \text{ m}$
- Position du CG de l'essieu supplémentaire : 6.5 m

$$CG = \frac{4226 \times 7.32 + 2818 \times 2.01 + 1000 \times 6.5}{(4226 + 2818 + 1000)}$$

CG = 5.42 m à partir de l'arrière de la semi-remorque
 À partir de l'essieu arrière = $5.42 \text{ m} - 0.76 \text{ m} = 4.66 \text{ m}$

2.1.4 Semi-remorque 32 pieds 1 essieu

Tableau 8

Valeurs utilisées pour définir une semi-remorque de 32 pieds et 1 essieu

Variable	Définition	Valeur
h	Hauteur de la plate-forme	1.37 m
Lt	Longueur totale de la semi-remorque	9.75 m
d	Distance entre les essieux de la semi-remorque	1.25 m
e	Position de l'essieu arrière par rapport à l'arrière de la semi-remorque	0.76 m
b	Position de la béquille par rapport à l'essieu arrière de la semi-remorque	5.33 m
M1	Masse totale de la semi-remorque vide	3816 Kg
X1	Position du centre de gravité en X de la semi-remorque vide par rapport à l'essieu arrière de celle-ci	3.04 m
Y1	Position du centre de gravité en Y de la semi-remorque vide par rapport au sol	1.05 m
Nes	Nombre d'essieux sur la semi-remorque	1

Détail des calculs

- Évaluation du poids du fourgon = $4666 \text{ kg} \times (32/53) = 2816 \text{ kg}$
- Masse de l'ensemble essieu simple : 1000 kg
- Masse totale de la semi-remorque = $1000 + 2816 = 3816 \text{ kg}$
- Position du CG du fourgon = $Lt / 2 = 9.75 \text{ m} / 2 = 4.88 \text{ m}$
- Position du CG de l'ensemble essieu simple = $e = 0.76 \text{ m}$

$$CG = \frac{2816 \times 4.88 + 1000 \times 0.76}{(2816 + 1000)}$$

CG = 3.8 m à partir de l'arrière de la semi-remorque
 À partir de l'essieu arrière = $3.8 \text{ m} - 0.76 \text{ m} = \mathbf{3.04 \text{ m}}$

2.1.5 Semi-remorque 45 pieds 2 essieux

Tableau 9

Valeurs utilisées pour définir une semi-remorque de 45 pieds et 2 essieux

Variable	Définition	Valeur
h	Hauteur de la plate-forme	1.37 m
Lt	Longueur totale de la semi-remorque	13.71 m
d	Distance entre les essieux de la semi-remorque	1.25 m
e	Position de l'essieu arrière par rapport à l'arrière de la semi-remorque	1.52 m
b	Position de la béquille par rapport à l'essieu arrière de la semi-remorque	8.53 m
M1	Masse totale de la semi-remorque vide	5870 Kg
X1	Position du centre de gravité en X de la semi-remorque vide par rapport à l'essieu arrière de celle-ci	3.8 m
Y1	Position du centre de gravité en Y de la semi-remorque vide par rapport au sol	1.05 m
Nes	Nombre d'essieux sur la semi-remorque	1

Détail des calculs

- Évaluation du poids du fourgon : $4666 \text{ kg} \times (45/53) = 3961 \text{ kg}$
- Poids de l'ensemble des deux essieux : 1909 kg
- Poids total de la semi-remorque = $1909 \text{ kg} + 3961 \text{ kg} = 5870 \text{ kg}$
- Position du CG du fourgon = $Lt / 2 = 13.71 \text{ m} / 2 = 6.86 \text{ m}$
- Position du CG de l'ensemble des essieux = $d/2 + e = 1.25 \text{ m} / 2 + 1.52 \text{ m} = 2.145 \text{ m}$

$$CG = \frac{3961 \times 6.86 + 1909 \times 2.15}{5870}$$

CG = 5.33 m à partir de l'arrière de la semi-remorque

À partir de l'essieu arrière = 5.33 m – 1.52 m = **3.8 m**

2.2 Données sur les chariots élévateurs

Les chariots élévateurs considérés pour cette étude sont des chariots à moteur à combustion interne avec pneus à bandage plein. Ce sont généralement le type de chariot que l'on retrouve pour le transbordement de marchandise dans les fourgons. Après une recherche auprès de différentes compagnies, on a constaté que tous les chariots de capacité équivalente ont des propriétés semblables. C'est pourquoi un seul constructeur a été choisi pour modéliser toute la gamme des chariots. Le constructeur retenu est Toyota.

Six différents modèles de cette compagnie ont été retenus. Les caractéristiques qui serviront à les définir sont résumées aux tableaux 10 à 15.

2.2.1 Données sur chariots élévateurs à combustion interne

Tableau 10

Modèle 7FGCU18 (3 500 lbs)

Marque et modèle	Toyota 7FGCU18
Capacité	1588 Kg (3500 lbs)
Vitesse en charge	17.5 Km/h
Masse du chariot	2907.5 kg
Centre de gravité de la charge (en X)	1 m
Centre de gravité de la charge (en Y)	0.75 m
Centre de gravité du chariot vide (en X)	0.735 m
Centre de gravité du chariot vide (en Y)	0.5 m
Longueur des fourches	1.47 m

Tableau 11

Modèle 7FGCU30 (6 000lbs)

Marque et modèle	Toyota 7FGCU30
Capacité	2721 Kg (6000 lbs)
Vitesse en charge	17 Km/h
Masse du chariot	4346 kg
Centre de gravité de la charge (en X)	1.05 m
Centre de gravité de la charge (en Y)	0.735 m
Centre de gravité du chariot vide (en X)	0.967 m
Centre de gravité du chariot vide (en Y)	0.55 m (évaluation)
Longueur des fourches	1.52 m

Tableau 12

Modèle 7FGCU35 (8 000lbs)

Marque et modèle	Toyota 7FGCU35
Capacité	3629 Kg (8000 lbs)

Vitesse en charge	19 Km/h
Masse du chariot	5770 kg
Centre de gravité de la charge (en X)	1.065 m
Centre de gravité de la charge (en Y)	0.709 m
Centre de gravité du chariot vide (en X)	1.007 m
Centre de gravité du chariot vide (en Y)	0.65 m (évaluation)
Longueur des fourches	1.534 m

Tableau 13

Modèle 7FGCU45 (10 000lbs)

Marque et modèle	Toyota 7FGCU45
Capacité	4536 Kg (10000 lbs)
Vitesse en charge	19 Km/h
Masse du chariot	6872 kg
Centre de gravité de la charge (en X)	1.065 m
Centre de gravité de la charge (en Y)	0.709 m
Centre de gravité du chariot vide (en X)	1.071 m
Centre de gravité du chariot vide (en Y)	0.65 m (évaluation)
Longueur des fourches	1.534 m

Tableau 14

Modèle 7FGCU55 (12 000lbs)

Marque et modèle	Toyota 7FGCU55
Capacité	5443 Kg (12000 lbs)
Vitesse en charge	20.9 Km/h
Masse du chariot	8092 kg
Centre de gravité de la charge (en X)	1.131 m
Centre de gravité de la charge (en Y)	0.725 m
Centre de gravité du chariot vide (en X)	1.135 m
Centre de gravité du chariot vide (en Y)	0.65 m (évaluation)
Longueur des fourches	1.6 m

Tableau 15

Modèle 7FGCU60 (13 500lbs)

Marque et modèle	Toyota 7FGCU60
Capacité	6123 Kg (13500 lbs)
Vitesse en charge	20.9 Km/h
Masse du chariot	8650 kg
Centre de gravité de la charge (en X)	1.131 m
Centre de gravité de la charge (en Y)	0.725 m
Centre de gravité du chariot vide (en X)	1.16 m
Centre de gravité du chariot vide (en Y)	0.65 m (évaluation)
Longueur des fourches	1.6 m

2.3 Coefficient de friction entre les pneus du chariot élévateur et le plancher de la semi-remorque

On assumera que le coefficient de friction statique entre le plancher de la semi-remorque et des roues du chariot sera de 0,7.

Source : www.new+.phys.unsw.edu.au/nepe/111/lecture... (plus disponible)

3 ANALYSE

Pour l'étude sur le basculement, beaucoup de paramètres peuvent être modifiés. Cependant, seul quelques-uns seront utilisés et modifiés pour l'étude.

3.1 Conditions retenues

L'étude est divisée en cinq sections, soit cinq types de semi-remorques.

- 1- semi-remorque 53 pieds 2 essieux
- 2- semi-remorque 53 pieds 3 essieux
- 3- semi-remorque 48 pieds 4 essieux
- 4- semi-remorque 32 pieds 1 essieu
- 5- semi-remorque 45 pieds 2 essieux

Dans chaque section, il y a deux conditions de chargement ;

- une sans chargement à bord de la semi-remorque ;
- l'autre avec un chargement de 1000 kg avec un encombrement correspondant de 1 mètre. (charge de 500 kg pour le modèle 32 pieds)

Pour chaque cas de chargement, il existe trois puissances de freinage (ou vitesse initiale).

- I- 100% de la puissance de freinage du chariot en pleine charge,
- II- 50% de la puissance
- III- 25% de la puissance

Dans chaque tableau, on étudie six types de chariots, 3500, 6000, 8000, 10000, 12000, et 13500 livres de capacité. Ces chariots sont reconnus comme étant les plus courants sur le marché. De plus, à partir de 13500 livres, il y a danger d'endommager la semi-remorque. Finalement, on fait varier la pente du site entre les valeurs de -10% et 10%. On considère que dépassé une pente de 10% (positive ou négative), le site de transbordement est hors de l'étendue de notre étude.

Les tableaux des résultats se retrouvent à la fin de la présente annexe.

3.2 Analyse des résultats

3.2.1 Influence du type de semi-remorque et de sa géométrie

Premièrement, on observe que pour la semi-remorque de 53 pieds à trois essieux il n'y a aucun cas où elle est susceptible de basculer. On peut donc l'éliminer de notre étude car elle prouve que pour une semi-remorque de 53 pieds ayant trois essieux ou plus, il n'y a (en théorie) aucun danger de basculement.

Pour le cas classique et le plus répandu de la semi-remorque de 53 pieds à deux essieux, on observe que la semi-remorque sera instable pour des chariots élévateurs de 10000 livres et plus. Par contre, ces données ont été calculées à pleine vitesse du chariot, soit à environ 20 km/h. Pour des conditions plus réalistes, soit à 50% de la vitesse maximum, il n'y a pas, en théorie, de possibilités de basculement. Nous pouvons donc dire que les semi-remorques de 53 pieds deux essieux sont stables en condition normale de freinage.

Pour la semi-remorque de 48 pieds à quatre essieux, on observe sensiblement les mêmes conditions. À 50% de la vitesse du chariot, il n'existe aucune possibilité de basculement.

Tel qu'on peut le constater sur les tableaux des résultats, les semi-remorques de 32 pieds à un essieu sont particulièrement à risque. Même à 25% de la vitesse maximum d'un chariot de 3500 livres de capacité, le basculement est inévitable. Si la barre anti-encastrement devait reprendre les efforts causés par le basculement, elle aurait à supporter près de 1500 kg (3300 lbs) pour un chariot de 6000 livres. L'entrée d'un chariot élévateur dans une semi-remorque de ce type est donc peu recommandable sans dispositif de sécurité pour la retenir.

Pour fins de vérification, un essai supplémentaire a été effectué sur une semi-remorque hypothétique de 45 pieds avec deux essieux. À 50% de la vitesse, et ce pour des chariots à partir de 10000 livres de capacité, il existe une possibilité de basculement. Si on compare avec la semi-remorque de 53 pieds avec le même nombre d'essieux, on remarque une nette détérioration de la stabilité en diminuant seulement de 8 pieds de longueur. En conclusion, plus la semi-remorque est courte, plus il y a danger de basculement pour ce type de semi-remorque.

3.2.2 Les efforts repris par la barre anti-encastrement

Les efforts maximum sont ceux générés par la semi-remorque de 32 pieds. À 50% de la vitesse, on peut atteindre des efforts de 4439 kg à la barre anti-encastrement.

3.2.3 Effet de la pente du site sur les résultats

La variation de l'effort repris par la barre anti-encastrement peut aller jusqu'à 1100kg entre -10% et 10% de pente. Cette variation est fonction du poids du chariot élévateur. Plus le chariot est lourd, plus l'effet sur la variation de la pente est perceptible.

4 CONCLUSION

Un bref retour sur les résultats obtenus par simulation nous permet de dire qu'il existe une multitude de cas possible. Néanmoins, il reste des cas très courants où les dangers de basculements sont très grands. Un point important à retenir est que la semi-remorque de 53 pieds à deux essieux ou plus ne représente potentiellement aucun danger de basculement à priori. Par contre, une attention toute particulière doit être apportée à une semi-remorque plus courte comportant deux essieux ou moins. On remarque que selon les résultats, les risques de basculement sont élevés. Il est important de noter aussi l'ordre de grandeur des efforts repris par la barre anti-encastrement. Ce sont des efforts qui peuvent varier entre 1000 kg et 4439 kg dans les cas les plus courants. Mais rien ne nous dit que la barre est capable de reprendre ces efforts sans se détériorer ou se déformer.

Enfin, il faut souligner les limites de cette étude. En effet, tous les calculs ont été effectués avec un modèle simple qui n'est qu'une approximation de la réalité. Ensuite, les ordres de grandeur des données concernant les semi-remorques, la force de décélération et la pente, sont basés sur des cas réels mais ne représentent peut être pas tous les cas possibles.

5 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Automotive handbook (5th edition). Bosch
2. Cyril M. Harris. Shock and vibration handbook (4th edition). Mc Graw-Hill
3. Haleenruy, Thierry. Les liaisons au sol, ETAI

Chariots élévateurs :

1. <http://www.tcmforklifts.com>
2. <http://www.hyster.co.uk>
3. <http://www.nissanforklifts.com>

Semi-remorques

1. Ministère des transports du Québec :
<http://www.mtq.gouv.qc.ca/marchandises/camionage/charges/normes.htm>
2. <http://www.greatdanetrailers.com>
3. <http://www.stoughtontrailers.com>
4. <http://www.canammanac.com/manac.nsf/Francais!OpenPage>

Tableaux des résultats de l'analyse

Tableau 1 A

Remorque 53 pieds 2 essieux
 Sans charge à bord
 Position de la béquille 10,37 mètres
 100% de la puissance maximum de freinage du chariot

Capacité du chariot élévateur (lbs)	Réaction contre le basculement à la barre ICC (en kg)				
	Pente du site (pourcentage)				
	-10	-5	0	5	10
3500	0	0	0	0	0
6000	0	0	0	0	0
8000	0	0	0	0	0
10000	0	0	0	3	123
12000	99	239	375	516	652
13500	412	563	712	860	1005

Tableau 1 B

Remorque 53 pieds 2 essieux
 Avec charge de 1000 kg à bord (avec un mètre d'encombrement)
 Position de la béquille 10,37 mètres
 100% de la puissance maximum de freinage du chariot

Capacité du chariot élévateur (lbs)	Réaction contre le basculement à la barre ICC (en kg)				
	Pente du site (pourcentage)				
	-10	-5	0	5	10
3500	0	0	0	0	0
6000	0	0	0	0	0
8000	0	0	0	0	0
10000	0	0	0	0	0
12000	0	0	0	0	0
13500	0	0	0	0	88

Tableau 2 A

Remorque 53 pieds 3 essieux

Sans charge à bord

Position de la béquille 10,98 mètres

100% de la puissance maximum de freinage du chariot

Capacité du chariot élévateur (lbs)	Réaction contre le basculement à la barre ICC (en kg)				
	Pente du site (pourcentage)				
	-10	-5	0	5	10
3500	0	0	0	0	0
6000	0	0	0	0	0
8000	0	0	0	0	0
10000	0	0	0	0	0
12000	0	0	0	0	0
13500	0	0	0	0	0

Tableau 3 A

Remorque 53 pieds 3 essieux

Avec charge de 1000 kg à bord (avec un mètre d'encombrement)

Position de la béquille 10,98 mètres

100% de la puissance maximum de freinage du chariot

Capacité du chariot élévateur (lbs)	Réaction contre le basculement à la barre ICC (en kg)				
	Pente du site (pourcentage)				
	-10	-5	0	5	10
3500	0	0	0	0	0
6000	0	0	0	0	0
8000	0	0	0	0	0
10000	0	0	0	0	0
12000	0	0	0	0	0
13500	0	0	0	0	0

Tableau 3 A

Remorque 48 pieds 4 essieux
 Sans charge à bord
 Position de la béquille 10,2 mètres
 100% de la puissance maximum de freinage du chariot

Capacité du chariot élévateur (lbs)	Réaction contre le basculement à la barre ICC (en kg)				
	Pente du site (pourcentage)				
	-10	-5	0	5	10
3500	0	0	0	0	0
6000	0	0	0	0	0
8000	0	0	0	0	0
10000	0	0	0	0	0
12000	0	0	20	185	348
13500	53	227	404	580	756

Tableau 3 B

Remorque 48 pieds 4 essieux
 Avec charge de 1000 kg à bord (avec un mètre d'encombrement)
 Position de la béquille 10,2 mètres
 100% de la puissance maximum de freinage du chariot

Capacité du chariot élévateur (lbs)	Réaction contre le basculement à la barre ICC (en kg)				
	Pente du site (pourcentage)				
	-10	-5	0	5	10
3500	0	0	0	0	0
6000	0	0	0	0	0
8000	0	0	0	0	0
10000	0	0	0	0	0
12000	0	0	0	0	0
13500	0	0	0	0	0

Tableau 4 A III

Remorque 32 pieds 1 essieu
 Sans charge à bord
 Position de la béquille 5,33 mètres
 25% de la puissance maximum de freinage du chariot

Capacité du chariot élévateur (lbs)	Réaction contre le basculement à la barre ICC (en kg)				
	Pente du site (pourcentage)				
	-10	-5	0	5	10
3500	0	41	147	253	358
6000	614	764	914	1061	1204
8000	1256	1452	1644	1832	2015
10000	1825	2057	2284	2506	2718
12000	2287	2557	2822	3079	3326
13500	2662	2949	3235	3512	3784

Tableau 4 B III

Remorque 32 pieds 1 essieu
 Avec charge de 500 kg à bord (avec un mètre d'encombrement)
 Position de la béquille 5,33 mètres
 25% de la puissance maximum de freinage du chariot

Capacité du chariot élévateur (lbs)	Réaction contre le basculement à la barre ICC (en kg)				
	Pente du site (pourcentage)				
	-10	-5	0	5	10
3500	0	0	72	187	300
6000	101	258	415	571	724
8000	363	564	763	960	1154
10000	605	840	1073	1304	1530
12000	721	993	1263	1530	1791
13500	887	1181	1473	1761	2042

Tableau 5 A III

Remorque 45 pieds 2 essieux

Sans charge à bord

Position de la béquille 8,53 mètres

25% de la puissance maximum de freinage du chariot

Capacité du chariot élévateur (lbs)	Réaction contre le basculement à la barre ICC (en kg)				
	Pente du site (pourcentage)				
	-10	-5	0	5	10
3500	0	0	0	0	0
6000	0	0	0	0	0
8000	0	0	0	0	0
10000	0	0	0	0	0
12000	0	0	0	0	0
13500	0	0	0	0	0