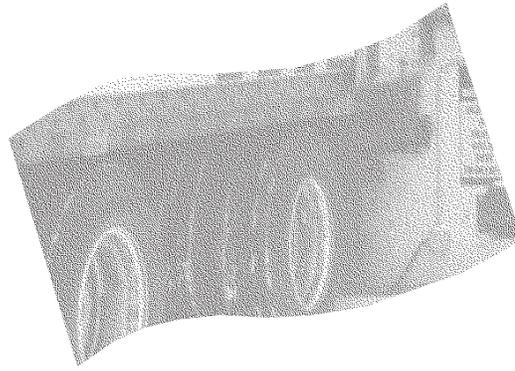


**Développement d'un outil
d'évaluation des mesures
de retenue des camions
aux quais de transbordement**

**Étude par modélisation
du glissement
d'une semi-remorque**



**ÉTUDES ET
RECHERCHES**

François Gauthier
Laurent Giraud
Réal Bourbonnière
Sylvain Bournival

Jean-Guy Richard
Renaud Daigle
Serge Massé

RRS-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 par modélisation
du glissement
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

ANNEXE E

Avis de non-responsabilité

L'IRSST ne donne aucune garantie relative à l'exactitude, la fiabilité ou le caractère exhaustif de l'information contenue dans ce document. En aucun cas l'IRSST ne saurait être tenu responsable pour tout dommage corporel, moral ou matériel résultant de l'utilisation de cette information.

Notez que les contenus des documents sont protégés par les législations canadiennes applicables en matière de propriété intellectuelle.

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.

TABLE DES MATIÈRES

1	Élaboration du modèle	3
1.1	Équation de base.....	3
1.2	Définition des variables d'entrées utilisées.....	3
1.2.1	<i>Semi-remorque</i>	3
1.2.2	<i>Chariot élévateur</i>	4
1.2.3	<i>Quai de transbordement</i>	4
1.3	Force horizontale générée par la décélération du chariot.....	5
1.4	Force verticale générée par la suspension.....	6
1.5	Calcul de la réaction normale aux pneus Nz et à la béquille N1.....	6
1.6	Efforts repris par la anti-encastrement	7
2	Partie II : Recherche de données	8
2.1	Données sur les semi-remorques.....	8
2.1.1	<i>Semi-remorque 53 pieds 2 essieux</i>	8
2.2	Données sur les chariots élévateurs.....	8
2.2.1	<i>Données sur chariots élévateurs à combustion interne</i>	9
2.3	Coefficients de friction.....	9
2.3.1	<i>Coefficient de friction entre les pneus du chariot et du bois</i>	9
2.3.2	<i>Coefficients de friction entre les pneus de la semi-remorque et le sol</i>	10
2.3.3	<i>Coefficients de friction entre les pattes en acier de la béquille et le sol</i> ...	10
3	Partie III : L'analyse	11
3.1	Conditions retenues	11
3.2	Résultats de l'étude	11
3.3	Analyse des résultats	11
3.3.1	<i>Influence du type de chariot</i>	11
3.3.2	<i>Les efforts repris par la barre anti-encastrement</i>	11
3.3.3	<i>Effet de la pente du site sur les résultats</i>	12
3.3.4	<i>Forces de friction</i>	12
4	Conclusion	13
5	Références bibliographiques	14
ANNEXE E.1		15
	Données sur les coefficients de friction	15
ANNEXE E.2		23
	Tableau des résultats des analyses	23

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. Le glissement s'effectue si la force de friction des pneus et de la béquille est moins grande que la force générée par le freinage du chariot élévateur

Si on considère;

$$\text{Force de freinage} + \text{force causée par la pente} > \text{ou} < (N_{\text{roues}} \times \mu_1 + N_{\text{béquille}} \times \mu_2)$$

Si la force de freinage ainsi que les forces gravitationnelles sont plus élevées que la force de friction totale, alors, la semi-remorque glisse.

1.2 Définition des variables d'entrées utilisées

1.2.1 Semi-remorque

Soit une semi-remorque de n'importe quel type et de n'importe quelle dimension, les variables la définissant sont résumées dans le tableau 1.

Tableau 1
Variables définissant la semi-remorque

Variable	Définition	Unités
LIFTMU	Coefficient de friction correspondant au type de plancher de la semi-remorque	Aucune
H	Hauteur de la plate-forme	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 à lège	Kg
X1	Position du centre de gravité en X de la semi-remorque à lège par rapport à l'essieu arrière de celle-ci	m
Y1	Position du centre de gravité en Y de la semi-remorque à lège 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 standard à deux essieux et quatre roues avec fourches à l'avant dont les variables sont décrites au tableau 2.

Tableau 2
Variables définissant le 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 à lège	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 à lège à partir des roues avant du chariot	m
LIFTCGY0	Position du centre de gravité en Y du chariot à lège 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
Variables définissant le 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 : on monte vers le quai, négatif : on descend vers le quai)	Pourcentage (%)

1.3 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 ;

$$Fmax = M2 * liftmu * Cos(teta)$$

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

$$Ffreinage = M2 (V*pvit)^2 / 2 S$$

$$Ffreinage = M2 (V pvit)^2 2 Fmax / 2 M2 V^2$$

$$Ffreinage = pvit^2 Fmax$$

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 ».

$$Ffreinage = Fmax pvit^2$$

En combinant;

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

1.4 Force verticale générée par la suspension

Soit une suspension conventionnelle avec amortissement. On considère que l'oscillation de la suspension causée par le chariot qui entre sur la semi-remorque induit une force qui réduit la réaction Nz. La position de la suspension en tout temps est;

$$y = \frac{F e^{-\xi \omega n t} x \sin(\omega d t + A)}{k \sin A}$$

Où,

$$\begin{aligned} \omega n &= (k / Nz)^{1/2} \\ \xi &= c / (Nz nes \omega n) \\ \omega d &= \omega n (1 - \xi^2)^{1/2} \\ A &= \arctan(\omega d / \omega n \xi) \end{aligned}$$

En dérivant l'équation on obtient la vitesse V;

$$V = - \frac{F (e^{-\xi \omega n t} x \xi \omega n \sin(\omega d t + A) + \omega d \cos(\omega d t + A))}{k \sin A}$$

En dérivant une fois de plus on obtient l'accélération;

$$a = - \frac{F (e^{-\xi \omega n t} x \sin(\omega d t + A) (\xi^2 \omega n^2 - \omega d^2) - 2 \xi \omega n \omega d \cos(\omega d t + A))}{k \sin A}$$

La force induite par la suspension est;

$$F_{\text{suspension}} = Nz x a / 9,81$$

1.5 Calcul de la réaction normale aux pneus Nz et à la béquille N1

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 ;

$$\begin{aligned} \text{Levier 1} &= X1 - b + Y1 \tan \theta \\ \text{Levier 2} &= \text{liftstop} - b + Y2 \tan \theta \\ \text{Levier pour force de freinage} &= Y2 \\ \text{Levier pour la suspension (Levier 3)} &= Nes b - d (Nes / 2) (Nes - 1) \end{aligned}$$

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

$$Nz = \frac{(- M1 (Levier1) - M2 (Levier 2) - Fusp. (Levier 3)) \cos \theta - Ffreinage Y2}{Nes b - d (Nes / 2) (Nes - 1)}$$

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

Connaissant Nz, on calcule N1 de la façon suivante;

$$\Sigma fy = N1 + Nz \times nes - M1 \cos \theta - M2 \cos \theta - Fsuspension \times nes$$

D'où,

$$N1 = - Nz \times nes + M1 \cos \theta + M2 \cos \theta + Fsuspension \times nes$$

La force en X est;

$$Fx = M1 \sin \theta + M2 \sin \theta + Ffreinage$$

1.6 Efforts repris par la barre anti-encastrement

Lorsque la force de friction est inférieure aux forces qui s'y opposent, il y a glissement. Si l'on considère que la barre anti-encastrement est capable de retenir la semi-remorque dans de tel cas, nous devons donc calculer la réaction contre glissement à la barre anti-encastrement. Cette réaction est définie par;

$$ICCx = Fx - Fmax1 - Fmaxz$$

2 PARTIE II : 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. Une semi-remorque Manac de 53 pieds avec deux essieux a été utilisée comme modèle de base.

2.1.1 Semi-remorque 53 pieds 2 essieux

Le tableau 4 résume les données recensées pour une semi-remorque de 53 pieds et 2 essieux.

Tableau 4
Paramètres de la 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 à lège	6575 Kg
X1	Position du centre de gravité en X de la semi-remorque à lège par rapport à l'essieu arrière de celle-ci	4.37 m
Y1	Position du centre de gravité en Y de la semi-remorque à lège par rapport au sol	1.05 m
Nes	Nombre d'essieux sur la semi-remorque	2

2.2 Données sur les chariots élévateurs

Les chariots considérés pour cette étude sont du type 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, il a été 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.

Pour l'étude du glissement, trois différents modèles de cette compagnie ont été retenus. Voici leurs caractéristiques qui serviront à modéliser les chariots.

2.2.1 Données sur chariots élévateurs à combustion interne

Le tableau 5 donne toutes les données utilisées pour décrire les différents chariots-élévateurs utilisés lors de la simulation.

Tableau 5

Données recensées pour les chariots-élévateurs

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 à lège (en X)	0.967 m
Centre de gravité du chariot à lège (en Y)	0.55 m (évaluation)
Longueur des fourches	1.52 m

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 à lège (en X)	1.007 m
Centre de gravité du chariot à lège (en Y)	0.65 m (évaluation)
Longueur des fourches	1.534 m

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 à lège (en X)	1.135 m
Centre de gravité du chariot à lège (en Y)	0.65 m (évaluation)
Longueur des fourches	1.6 m

2.3 Coefficients de friction

2.3.1 Coefficient de friction entre les pneus du chariot et du bois

On assumera que le coefficient de friction statique sera de 0,7.

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

2.3.2 Coefficients de friction entre les pneus de la semi-remorque et le sol

Les coefficients de friction proviennent de « Automotive handbook » ainsi qu'un résumé sur un séminaire ayant eu lieu en Avril 1992 (IPTM, special problems seminar).

Les différents coefficients de friction sont :

- Asphalte sèche : 0,85
- Asphalte mouillée : 0,65
- Béton sec : 0,8
- Béton mouillé : 0,6
- Chaussée enneigée : 0,15
- Gravier : 0,55

2.3.3 Coefficients de friction entre les pattes en acier de la béquille et le sol

N'ayant trouvé aucune information à ce sujet, des tests sur le terrain ont été effectués. La plaque qui a été utilisée est en acier 1/16". Les dimensions sont 8" x 10". Le montage consiste en une plaque d'acier sur laquelle on dépose différents poids. On utilise un câble d'acier pour tirer le montage jusqu'à ce qu'il y ait glissement. L'instrument de mesure est un dynamomètre utilisé pour vérifier la force de serrage d'une main.

Les poids utilisés, les tests effectués ainsi que les résultats sont en annexe E.1.

Coefficients trouvés :

- Asphalte sèche : 0,65
- Asphalte mouillée : 0,62
- Béton sec : 0,64
- Béton mouillé : 0,64
- Chaussée enneigée : 0,15 (assumé pareil a un pneu)
- Gravier : 0,63

3 PARTIE III : L'ANALYSE

Pour l'étude sur le glissement, 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 quatre sections, soit quatre types de conditions de sol.

- 1- Pavé sec
- 2- Pavé humide ou mouillé
- 3- Pavé enneigé/glacé
- 4- Gravier sec

dans chaque section, il y a trois conditions pour le chariot ;

- I- 100% de la puissance de freinage du chariot élévateur
- II- 50% de la puissance
- III- 25% de la puissance

Dans chaque tableau, on étudie trois types de chariots, 6000, 8000 et 12000, livres de capacité. Ces chariots sont reconnus comme étant les plus courants sur le marché. De plus, pour chaque condition on fait varier la pente entre 0 % et 10% dans le sens le plus nuisible.

Dans les tableaux, on trouve comme résultats la force de friction maximale à chaque appuis. Dans le cas où la semi-remorque glisse, on retrouve la force reprise par la barre anti-encastrement en supposant que c'est celle-ci qui retient la semi-remorque. Une force de 0 signifie qu'il n'y a pas de glissement.

3.2 Résultats de l'étude

Les résultats de l'étude sont présentés dans les tableaux apparaissant à l'annexe E.2.

3.3 Analyse des résultats

3.3.1 Influence du type de chariot

La force maximale de friction est proportionnelle au poids du chariot. Par contre, la force produite par le freinage augmente beaucoup plus rapidement. C'est pourquoi plus un chariot est lourd, plus le risque de glissement augmente.

3.3.2 Les efforts repris par la barre anti-encastrement

Selon les résultats, c'est seulement lorsque la chaussée est enneigée ou glacée qu'il y a glissement de la semi-remorque. Dans un cas de freinage d'urgence, on observe des efforts

pouvant aller jusqu'à 8 400 Kg. Pour un freinage normal (50%) on observe des efforts de l'ordre de 1 300 Kg pour des chariots de 5443 kilos (12000 lbs). À noter que cette étude n'évalue que le glissement pur, i.e. : lorsque les roues de la semi-remorque glissent. Le cas où les freins ne sont pas appliqués ainsi que le cas du rampage ne sont pas évalués ici.

3.3.3 Effet de la pente du site sur les résultats

La variation de la pente du site (pente vers l'extérieur) fait augmenter les forces générées dans la semi-remorque suite au freinage du chariot.

3.3.4 Forces de friction

Dans les conditions de sol d'asphalte mouillé, de béton mouillé et de gravier sec, les forces de frictions maximales sont sensiblement les mêmes. Dans les conditions de sol d'asphalte sec ou de béton sec, les forces de friction combinées (essieux et béquilles) semblent suffisantes pour assurer la stabilité de la semi-remorque dans toutes les conditions évaluées. On remarque cependant que pour un freinage d'urgence (100%), sur pavé sec, le pourcentage de la force de friction utilisé est entre 50% et 80%. Dans les situations de pavé mouillé ou de gravier sec, un freinage d'urgence (100%) peut utiliser jusqu'à 91-95% de la force de friction disponible ce qui pourrait être représenté comme une situation à risque élevé.

Dans le cas d'une chaussée enneigée, pratiquement toutes les conditions présentent un risque de glissement où 75% de la force de friction disponible est utilisée. La majorité de ces cas présentent en fait un dépassement de la force de friction disponible ce qui résulterait en un glissement.

4 CONCLUSION

Les calculs effectués sont basés sur un modèle mathématique simplifié de la réalité. L'interprétation des résultats de cette étude doit donc refléter les limites imposées par ce modèle et les variables qui y ont été introduites (dimensions, forces, coefficients de friction, etc.) Les résultats ont mis en évidence l'impact de certains des facteurs dans les conditions recrées. C'est ainsi que les coefficients de friction entre le sol et la semi-remorque, la vitesse du chariot, la masse du chariot et la pente de la cour (positive ou négative) influencent de façon importante les résultats obtenus. Il est aussi difficile de prédire quelles seront les conditions au sol (chaque cas est particulier) et de quelle façon l'opérateur réalisera le freinage du chariot dans la semi-remorque.

Les résultats montrent une tendance qui indique qu'il existe bien un risque de glissement dans certaines conditions. Plus les valeurs de puissance de freinage et de la pente du site sont élevées, plus cette tendance est marquée. Selon les résultats des calculs effectués, dans les conditions de pavé (sec ou humide) et de gravier sec, une utilisation de plus de 75% des forces de friction disponible n'est atteinte que lorsqu'il y a freinage d'urgence (100% de la force de freinage du chariot). Dans ces conditions, aucun dépassement de la valeur de friction disponible, qui résulterait en un glissement, n'est atteint. Par contre, la force de friction disponible est dépassée par les forces provoquées par le freinage du chariot et provoquerait le glissement de la remorque dans 14 situations de modélisation dans les conditions de pavé enneigé/glacé.

5 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Automotive handbook (5 th 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>

ANNEXE E.1

Données sur les coefficients de friction

342 Motor-vehicle dynamics

Motive force
The higher the engine torque M and over- at transmission ratio i between engine and driven wheels, and the lower the power-transmission losses, the higher is the motive force F available at the drive wheels.

$$F = \frac{M \cdot i}{r} \quad \text{or} \quad F = \frac{P \cdot \eta}{v}$$

η Drivetrain efficiency level (longitudinally installed engine $\eta = 0.88, 0.32$) (transverse engine $\eta = 0.91, 0.95$)

The motive force F is partially consumed in overcoming the running resistance F_w . Numerically higher transmission ratios are applied to deal with the substantially increased running resistance encountered on gradients (gearbox).

Vehicle and engine speeds

$$v = 60 \frac{v_r}{i}$$

$$v = 2 \cdot \pi \cdot r$$

Or with v in km/h:

$$n = \frac{1000 \cdot v}{i}$$

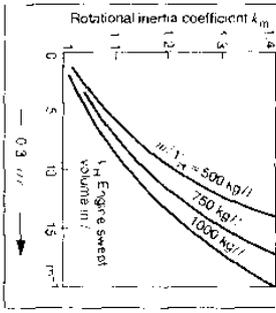
$$n = 2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot r$$

Acceleration

The surplus force $F - F_w$ accelerates the vehicle (or lands it when F_w exceeds F).

$$a = \frac{F - F_w}{m} \quad \text{or} \quad a = \frac{P - P_w}{m \cdot v}$$

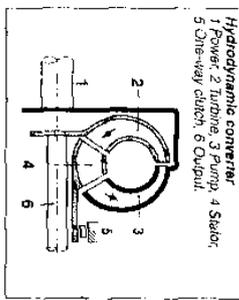
Determining the rotational inertia coefficient k_m



The rotational inertia coefficient k_m compensates for the apparent increase in vehicle mass due to the rotating masses (wheels, flywheel, crankshaft, etc.).

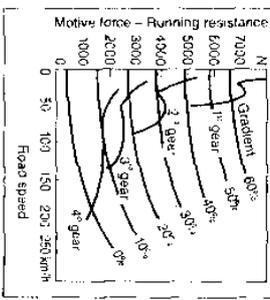
Motive force and road speed on vehicles with automatic transmissions

When the formula for motive force is applied to automatic transmissions with hydrodynamic torque converters or hydrodynamic clutches, the engine torque M is replaced by the torque at the converter turbine, while the rotational speed of the converter turbine is used in the formula for engine speed.



The relationship between $M_{turb} = \frac{1}{2} (m_{turb} a_{turb}^2)$ and the engine characteristic $M_{eng} = f(n_{eng})$ is determined using the characteristics of the hydrodynamic converter (P. 685).

Running diagram for car with automatic transmission under full throttle



Motor-vehicle dynamics 343

Adhesion to road surface

Coefficients of static friction for pneumatic tires on various surfaces

Variable speed mph	Tire condition	Road condition			Coefficient of static friction μ_{st}		
		Dry	Wet water approx 0.2 mm	Deep rainfall: water approx 1 mm deep	0.65	0.55	0.5
50	new	0.95	0.65	0.55	0.5	0.1 and less	
	worn 1	1	0.5	0.4	0.25		
80	new 1	0.8	0.4	0.3	0.05		
	worn 1	0.95	0.2	0.1	0.05		
100	new	0.75	0.35	0.2	0		
	worn 1	0.9	0.2	0.1	0		

The static coefficient of friction (between the tires and the road surface), also known as the tire-road-interface friction coefficient, is determined by the vehicle's speed, the condition of the tires (see table above), the figures cited apply for concrete and tarmac road surfaces in good condition. The coefficients of sliding friction (with wheel locked) are usually lower than the coefficients of static friction.

Special rubber compounds providing friction coefficients of up to 1.8 are employed in racing tires.

The maxima for acceleration and uphill driving, and for retardation and downhill braking, are provided on page 345.

Aquaplaning

Aquaplaning has a particularly dramatic influence on the contact between tire and road surface. It describes the state in which a layer of water separates the tire and the wet road surface. The phenomenon occurs when a wedge of water forces its way underneath the tire's contact patch and lifts it from the road. The tendency to aquaplan

1. Worn to tread depth of 2.16 mm, (legal limit - from Fr. Germany - see also, 36/2, StVZO FMVSS/CA11).

is dependent upon such factors as the depth of the water on the road surface, the vehicle's speed, the tread pattern, the tread wear, and the load pressing the tire against the road surface. Wide tires are particularly susceptible to aquaplaning. It is not possible to steer or brake an aquaplaning vehicle as its front wheels have ceased to rotate, meaning that neither steering inputs nor braking forces can be transmitted to the road surface.

Aquaplaning

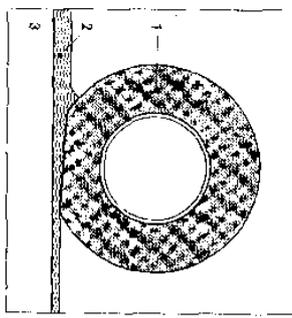


Table 4 UNUSUAL FRICTION COEFFICIENTS		
Pickup Truck Sliding	on Concrete	0.3-0.4
Passenger Car Skidding	on Concrete	0.3
	on Rough Asphalt	0.4
	on Gravel	0.5-0.7
Body Sheet Metal	on Dry Grass	0.5
	on Asphalt	0.4
	on Dirt	0.2
	on Body Sheet Metal (sideswipe)	0.6
<i>Collins, J. (1967) pp. 64, 88</i>		
Car	to Car	0.55
<i>Emori, R. (1968)</i>		
Engine Braking	High Gear	0.1
	Low Gear	0.1-0.2
Rolling Resistance	Normal Inflation	0.01
	Partial Inflation	0.013
	Flat Tire	0.017
Skidding	on Packed Snow	0.15
	on Ice or Sleet	0.07
<i>McHenry, R. and Lynch, J. (1976), p. 6-10</i>		
Motorcycle	Skidding on Side	0.55-0.7
Human Body	Skidding	1.1
	Tumbling	0.8
<i>Collins, J. (1979), pp. 130, 233, 241</i>		

IPTM, Special Problems Seminar, April 1992

Table 2
VARIOUS SURFACES FOR CARS AND TRUCKS

Description of Road Surface	Automobile Tire	Truck Tire
Dry Concrete	.85	.65
Dry Asphalt	.80	.60
Wet Concrete	.70-.80	.50
Wet Asphalt	.45-.80	.30
Packed Snow	.15	.15
Ice	.05	.11 (Dry) .07 (Wet)
Dry Dirt	.65	--
Mud	.40-.50	--
Gravel or Sand	.55	--
Wet, Oily, Smooth Concrete	--	.25
Hard-packed Snow w. Chains	--	.60
Dry Ice w. Chains	--	.25

Collins, J. (1979)

Table 3
VELOCITY DECREMENT VALUES

Indicated Speed mph	Percent Reduction of Friction Coefficient
40	3
50	7
60	9
70	11
80	14
90	18

Excellent

Collins, J. (1979), p. 178

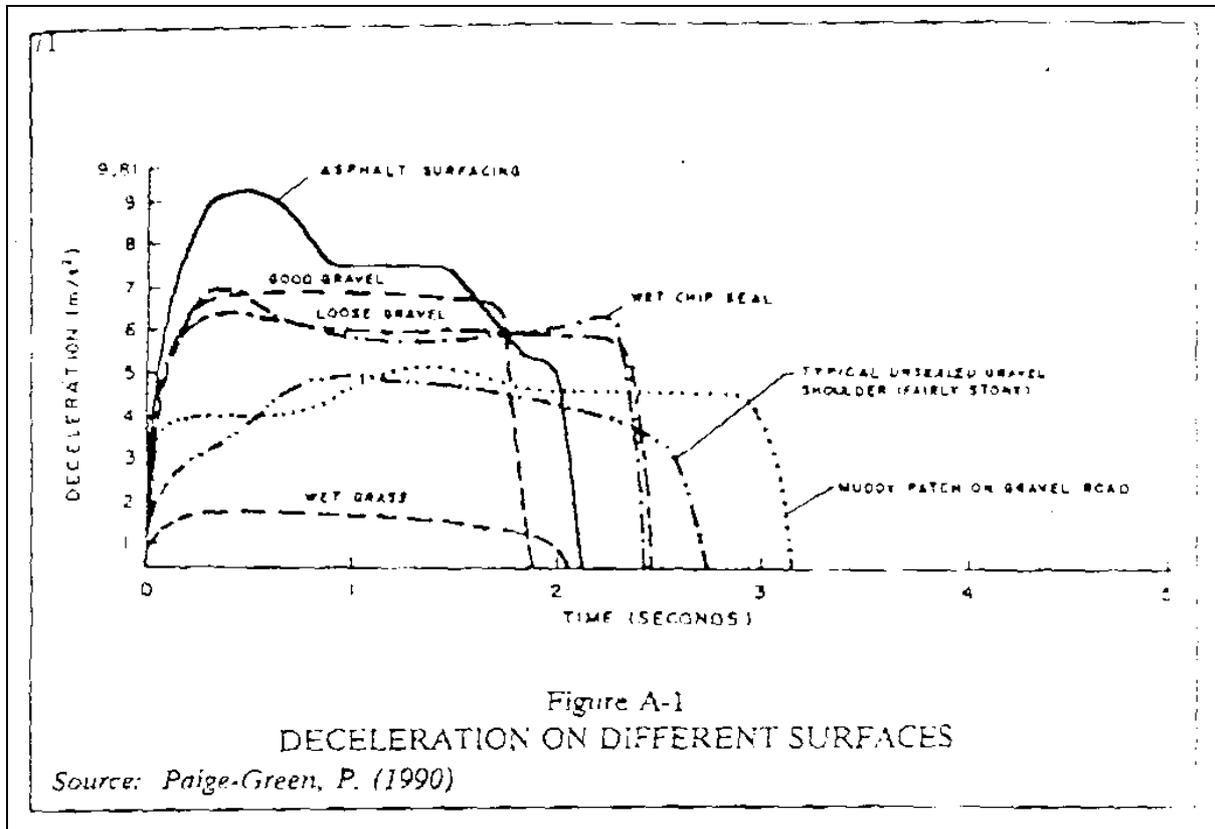
PARAMETERS FOR $\mu = \mu_0 - vV$, V in mph

	Dry Peak	Dry Sliding	Wet Peak	Wet Sliding
μ_0	0.95	0.85	0.75	0.70
v	0.0017	0.0025	0.0033	0.0050

Limpert, R. (1978), p. 160

Description of Road Surface	Dry Under 30 mph	Dry Over 30 mph	Wet Under 30 mph	Wet Over 30 mph
PORTLAND CEMENT				
New, Sharp	.80-1.20	.70-1.00	.50-.80	.40-.75
Travelled	.60-.80	.60-.75	.45-.70	.45-.65
Traffic Polished	.55-.75	.50-.65	.45-.65	.45-.60
ASPHALT, TAR				
New, Sharp	.80-1.20	.65-1.00	.50-.80	.45-.75
Travelled	.60-.80	.55-.70	.45-.70	.40-.65
Traffic Polished	.55-.75	.45-.65	.45-.65	.40-.60
Excess Tar	.50-.60	.35-.60	.30-.60	.25-.55
GRAVEL				
Packed, Oiled	.55-.85	.50-.80	.40-.80	.40-.60
Loose	.40-.70	.40-.70	.45-.75	.45-.75
CINDERS				
Packed	.50-.70	.50-.70	.65-.75	.65-.75
ROCK				
Crushed	.55-.75	.55-.75	.55-.75	.55-.75
ICE				
Smooth	.10-.25	.07-.20	.05-.10	.05-.10
SNOW				
Packed	.30-.55	.35-.55	.30-.60	.30-.60
Loose	.10-.25	.10-.20	.30-.60	.30-.60

Baker, J. (1975)



Tests sur le terrain sur le coefficient de friction entre l'acier et différents types de revêtements

plaque: 0,971 kg
 Poids #1: 18,38 kg
 Poids #2: 18,9 kg
 Poids #3: 10,62 kg

Test 1: Asphalté sèche

Poids utilisés	Masse totale	essai 1	essai 2	essai 3	coefficient
plaque + poids#1	19,351	12,4			0,64
Plaque + poids #1 + poids #2	38,251	25,8	25,4		0,67
Plaque + poids #1 + poids #2 + poids #3	48,871	29	33,5		0,64
Moyenne:					0,65

Test 2: Béton sec

Poids utilisés	Masse totale	essai 1	essai 2	essai 3	coefficient
plaque + poids#1	19,351	13	13,25		0,68
Plaque + poids #1 + poids #2	38,251	24,4	25,8	25	0,66
Plaque + poids #1 + poids #2 + poids #3	48,871	30	27,4	29,4	0,59
Moyenne:					0,64

Test 3: Gravier sec

Poids utilisés	Masse totale	essai 1	essai 2	essai 3	coefficient
plaque + poids#1	19,351	11,5	10,5	12	0,57
Plaque + poids #1 + poids #2	38,251	23,7	25,5	20,5	0,61
Plaque + poids #1 + poids #2 + poids #3	48,871	45,5	31,5	28,5	0,72
Moyenne:					0,63

Test 4: Béton mouillé

Poids utilisés	Masse totale	essai 1	essai 2	essai 3	coefficient
plaque + poids#1	19,351	12,5	12,5	13	0,65
Plaque + poids #1 + poids #2	38,251	22,5	22,5	25	0,61
Plaque + poids #1 + poids #2 + poids #3	48,871	31	32,5	32,5	0,65
Moyenne:					0,64

Test 5: asphalté mouillée:

Poids utilisés	Masse totale	essai 1	essai 2	essai 3	coefficient
plaque + poids#1	19,351	12,5	12	12,5	0,63
Plaque + poids #1 + poids #2	38,251	22,5	25,2	24,5	0,63
Plaque + poids #1 + poids #2 + poids #3	48,871	29,4	27,2	29,8	0,59
Moyenne:					0,62

ANNEXE E.2

Tableaux des résultats de l'analyse

Tableau 1
Glissement d'une semi-remorque de 53 pieds 2 essieux, sur pavé sec

		Puissance de freinage du chariot élévateur (en pourcentage)					
		100%			50%		
		Pente du site			Pente du site		
Capacité du chariot (lbs)	Type de données	0%	5%	10%	0%	5%	10%
6000	Force de friction maximale pour les essieux (kg)	5210	5113	5004	5845	5747	5636
	Force de friction maximale à la béquille (kg)	4882	4945	4996	4394	4458	4510
	Force de friction réelle pour les essieux (kg)	4947	5113	5004	1237	1916	2588
	Force de friction réelle à la béquille (kg)	0	508	1275	0	0	0
	Pourcentage de la force de friction utilisée	49%	56%	63%	12%	19%	26%
	Force reprise par la barre ICC (kg)	-	-	-	-	-	-
8000	Force de friction maximale pour les essieux (kg)	5773	5654	5522	6638	6518	6382
	Force de friction maximale à la béquille (kg)	5964	6043	6106	5298	5377	5443
	Force de friction réelle pour les essieux (kg)	614	1325	2029	1645	2440	3226
	Force de friction réelle à la béquille (kg)	5964	6043	6106	0	0	0
	Pourcentage de la force de friction utilisée	56%	63%	70%	14%	21%	27%
	Force reprise par la barre ICC (kg)	-	-	-	-	-	-
12000	Force de friction maximale pour les essieux (kg)	6796	6640	6469	8039	7883	7708
	Force de friction maximale à la béquille (kg)	7858	7962	8046	6894	7000	7088
	Force de friction réelle pour les essieux (kg)	1616	2504	3381	2368	3370	4358
	Force de friction réelle à la béquille (kg)	7858	7962	8046	0	0	0
	Pourcentage de la force de friction utilisée	65%	72%	79%	16%	23%	29%
	Force reprise par la barre ICC (kg)	-	-	-	-	-	-

Tableau 2
Glissement d'une semi-remorque de 53 pieds 2 essieux, sur pavé humide

		Puissance de freinage du chariot élévateur (en pourcentage)					
		100%			50%		
		Pente du site			Pente du site		
Capacité du chariot (lbs)	Type de données	0%	5%	10%	0%	5%	10%
6000	Force de friction maximale pour les essieux (kg)	3984	3910	3826	4470	4395	4310
	Force de friction maximale à la béquille (kg)	4657	4717	4765	4191	4252	4302
	Force de friction réelle pour les essieux (kg)	289	904	1514	1237	1916	2588
	Force de friction réelle à la béquille (kg)	4657	4717	4765	0	0	0
	Pourcentage de la force de friction utilisée	57%	65%	73%	14%	22%	30%
	Force reprise par la barre ICC (kg)	-	-	-	-	-	-
8000	Force de friction maximale pour les essieux (kg)	4415	4324	4222	5076	4984	4880
	Force de friction maximale à la béquille (kg)	5689	5764	5824	5053	5129	5192
	Force de friction réelle pour les essieux (kg)	889	1604	2311	1644	0	0
	Force de friction réelle à la béquille (kg)	5689	5764	5824	0	2440	3226
	Pourcentage de la force de friction utilisée	65%	73%	81%	16%	24%	32%
	Force reprise par la barre ICC (kg)	-	-	-	-	-	-
12000	Force de friction maximale pour les essieux (kg)	5197	5078	4947	6148	6028	5894
	Force de friction maximale à la béquille (kg)	7495	7595	7675	6576	6677	6760
	Force de friction réelle pour les essieux (kg)	1978	2871	3752	0	0	0
	Force de friction réelle à la béquille (kg)	7495	7595	7675	2369	3370	4358
	Pourcentage de la force de friction utilisée	75%	83%	91%	19%	27%	34%
	Force reprise par la barre ICC (kg)	-	-	-	-	-	-

Tableau 3
Glissement d'une semi-remorque de 53 pieds 2 essieux, sur pavé enneigé / glacé

		Puissance de freinage du chariot élévateur (en pourcentage)					
		100%			50%		
		Pente du site			Pente du site		
Capacité du chariot (lbs)	Type de données	0%	5%	10%	0%	5%	10%
6000	Force de friction maximale pour les essieux (kg)	919	902	883	1031	1014	995
	Force de friction maximale à la béquille (kg)	1126	1141	1152	1014	1028	1041
	Force de friction réelle pour les essieux (kg)	919	902	883	1031	888	995
	Force de friction réelle à la béquille (kg)	1126	1141	1152	205	1028	1041
	Pourcentage de la force de friction utilisée	100%	100%	100%	60%	94%	100%
	Force reprise par la barre ICC (kg)	2900	3578	4243	-	-	553
8000	Force de friction maximale pour les essieux (kg)	1019	998	974	1171	1150	1126
	Force de friction maximale à la béquille (kg)	1376	1394	1409	1222	1241	1256
	Force de friction réelle pour les essieux (kg)	1019	998	974	422	1150	1126
	Force de friction réelle à la béquille (kg)	1376	1394	1409	1223	1241	1256
	Pourcentage de la force de friction utilisée	100%	100%	100%	69%	100%	100%
	Force reprise par la barre ICC (kg)	4184	4976	5752	-	49	843
12000	Force de friction maximale pour les essieux (kg)	1199	1172	1142	1418	1391	1360
	Force de friction maximale à la béquille (kg)	1813	1837	1856	1591	1615	1636
	Force de friction réelle pour les essieux (kg)	1199	1172	1142	778	1391	1360
	Force de friction réelle à la béquille (kg)	1813	1837	1856	1591	1615	1636
	Pourcentage de la force de friction utilisée	100%	100%	100%	79%	100%	100%
	Force reprise par la barre ICC (kg)	6461	7457	8429	-	364	1362

Tableau 4
Glissement d'une semi-remorque de 53 pieds et 2 essieux, sur gravier sec

		Puissance de freinage du chariot élévateur (en pourcentage)					
		100%			50%		
		Pente du site			Pente du site		
Capacité du chariot (lbs)	Type de données	0%	5%	10%	0%	5%	10%
6000	Force de friction maximale pour les essieux (kg)	3371	3308	3237	3782	3718	3647
	Force de friction maximale à la béquille (kg)	4732	4794	4842	4259	4320	4371
	Force de friction réelle pour les essieux (kg)	214	828	1437	0	0	0
	Force de friction réelle à la béquille (kg)	4732	4794	4842	1236	1916	2588
	Pourcentage de la force de friction utilisée	61%	69%	78%	15%	24%	32%
	Force reprise par la barre ICC (kg)	-	-	-	-	-	-
8000	Force de friction maximale pour les essieux (kg)	3736	3658	3573	4295	4217	4130
	Force de friction maximale à la béquille (kg)	5781	5857	5918	5135	5212	5276
	Force de friction réelle pour les essieux (kg)	798	1511	2217	0	0	0
	Force de friction réelle à la béquille (kg)	5781	5857	5918	1645	2440	3226
	Pourcentage de la force de friction utilisée	69%	77%	86%	17%	26%	34%
	Force reprise par la barre ICC (kg)	-	-	-	-	-	-
12000	Force de friction maximale pour les essieux (kg)	4397	4296	4186	5197	5097	4983
	Force de friction maximale à la béquille (kg)	7616	7717	7799	6681	6784	6869
	Force de friction réelle pour les essieux (kg)	1858	2749	3629	0	0	0
	Force de friction réelle à la béquille (kg)	7616	7717	7799	2368	3370	4358
	Pourcentage de la force de friction utilisée	79%	87%	95%	20%	28%	37%
	Force reprise par la barre ICC (kg)	-	-	-	-	-	-