

Prévention des risques mécaniques et physiques

Études et recherches

RAPPORT R-863



**Développement de critères de conception
de cales de roues pour retenir les camions
et les semi-remorques aux quais de chargement**

*Denis Rancourt
Yves St-Amant
Stéphane Martel
Geneviève Masson*



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;

Assurer la diffusion des connaissances et jouer un rôle de référence scientifique et d'expertise;

Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.

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 : www.csst.qc.ca/AbonnementPAT

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec
2015
ISBN : 978-2-89631-5 (PDF)
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications
et de la valorisation de la recherche
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,
Février 2015



Prévention des risques mécaniques et physiques

Études et recherches

RAPPORT R-863

Développement de critères de conception de cales de roues pour retenir les camions et les semi-remorques aux quais de chargement

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.

Denis Rancourt, Yves St-Amant, Stéphane Martel et Geneviève Masson

Université de Sherbrooke



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

ÉVALUATION PAR DES PAIRS

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.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier Madame Guylaine Fillion pour son aide en matière de conception graphique qui contribue à mieux expliquer les différents paramètres de conception en jeu. De précieux échanges sur l'utilisation de cales de roues et les problématiques associées ont eu lieu avec Messieurs Robert Poulin de Beauceville (Québec, Canada), répartiteur pour une flotte de camions pendant de nombreuses années, Brad Kobielski de la Poudre Fire Authority de Fort Collins (Colorado, USA), anciennement membre du comité sur le Fire Department Apparatus de la National Fire Protection Association (NFPA), ainsi qu'avec les pompiers du poste d'incendie no 7 de la Ville de Sherbrooke. Nous les remercions pour cette contribution appréciée.

SOMMAIRE

La présente étude avait pour but de définir des critères de conception pour des cales de roues de camions et de semi-remorques utilisées aux quais de chargement. Ces critères devaient faire en sorte de permettre à la cale de maintenir immobilisé un camion ou un semi-remorque malgré trois éléments perturbateurs: le départ inopiné du camion ou du semi-remorque, le freinage des chariots élévateurs sur la plateforme de la semi-remorque et l'action de la gravité. Ces trois situations font en sorte que la semi-remorque peut s'éloigner spontanément ou progressivement du quai jusqu'à ce que la lèvre tombe et crée un vide dans lequel les roues d'un chariot élévateur peuvent s'introduire et mener à son renversement. Un quatrième élément perturbateur, le rampement antérieur de la semi-remorque, résultat d'une compression de la suspension de la semi-remorque par le chariot élévateur, a aussi été envisagé pour ajout dans le cahier des charges. Cependant, il n'a finalement pas été retenu, car la cale ne peut contribuer à limiter cette problématique, à moins d'être ancrée au sol. Bien que des dispositifs mécaniques existent pour ancrer la cale au sol ou la retenir au quai, ceux-ci présentent des contraintes d'utilisation en raison du climat hivernal que l'on retrouve au Québec. Par conséquent, notre étude s'est plutôt concentrée sur les critères qui feront en sorte de tirer profit de la résistance maximale au glissement de la cale sur le sol.

La littérature scientifique est particulièrement vierge sur les critères de conception de cale de roue. Les normes existantes et certains rapports techniques ont permis d'identifier des fonctions primaires et secondaires des cales, ainsi que des contraintes à la conception qui sont énumérées dans le présent rapport. À notre avis, l'ajout de critères ou de paramètres plus précis reviendrait à définir le design même de la cale, alors que plusieurs concepts sont éventuellement possibles. À titre indicatif, des valeurs cibles pour certains des paramètres sont établies dans le rapport. Parmi ceux-ci, c'est le profil géométrique de la surface de la cale en contact avec le pneu qui a retenu particulièrement notre attention, étant donné son impact sur plusieurs fonctions de la cale. Ce profil influence d'ailleurs les modes de défaillance qui seront observés lors de l'utilisation de la cale.

Notre étude a permis de comprendre qu'une cale mobile ne permettra probablement pas d'éviter tous les modes de défaillance potentiels, en particulier, le départ inopiné du camion ou du semi-remorque. Par conséquent, en matière de sécurité, il apparaît avantageux de contrôler le mode de défaillance qui se produira. L'étude a permis de déterminer que ce mode devrait être le glissement antérieur de la cale au sol, et non le passage de la roue par-dessus celle-ci. Ce choix a été fait car, même si la cale glisse, la résistance se maintiendra en tout temps, augmentant les chances de caler le moteur ou d'avertir le conducteur de la présence d'une anomalie. Si le pneu passe par-dessus la cale, il n'y aura plus aucune résistance par la suite. Cette situation se retrouve en particulier dans le cas de cales ancrées au sol et ayant une hauteur réduite. Il est important de remarquer que la cale mobile est un dispositif qui se substitue à l'action des freins du camion ou de la semi-remorque. Par conséquent, elle ne peut être plus performante que des pneus bloqués au sol, à moins qu'il y ait labourage du sol par la cale ou que celle-ci soit ancrée au sol.

La présente étude a permis de démontrer que la capacité de résistance au glissement d'une cale sur le sol est intimement liée à son profil géométrique et à sa raideur. Cet aspect n'a pas été traité dans la littérature. Afin d'illustrer les différents points à considérer dans le design d'une cale au

regard de son profil géométrique, un concept de cale a été proposé. Le concept ne tient toutefois pas compte des déformations des structures en jeu et il n'est pas unique. Bien que d'un point de vue théorique le concept apparaît très performant, des études expérimentales devront être effectuées pour confirmer les résultats des modèles théoriques.

Il a été démontré dans le présent rapport que lors de la situation de rampement ("dock walking") de la semi-remorque, la cale ne pouvait contribuer à en limiter le mouvement à moins d'être retenue au sol. D'autres solutions doivent être envisagées, dont l'utilisation d'un crochet de retenue à la barre d'encastrement ou l'utilisation de systèmes de barrure de la suspension.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	I
SOMMAIRE	III
TABLE DES MATIÈRES	V
LISTE DES TABLEAUX	VII
LISTE DES FIGURES.....	IX
1. INTRODUCTION.....	1
2. NORMES RELATIVES AUX CALES DE ROUES	2
3. RECENSEMENT DES ÉCRITS	5
3.1 Publications scientifiques	5
3.2 Rapport technique de la défense américaine.....	5
3.2.1 Résultats fournis.....	5
3.2.2 Analyse des résultats fournis	9
3.2.3 Analyse énergétique des modèles développés par Buchser (1984)	10
3.3 Rapport technique de l'IRSST sur les cales de roues	13
3.3.1 Résultats fournis.....	13
3.3.2 Analyse des résultats fournis	15
3.4 Recherche de brevets	18
3.5 Sommaire du recensement des écrits	20
4. MÉCANIQUE DU BLOCAGE D'UNE ROUE PAR UNE CALE	23
4.1 Phénomène de résistance au glissement de la cale au sol	23
4.2 Distance maximale de glissement ou de déplacement de la semi-remorque.....	26
4.3 Phénomène d'écrasement de la cale	27
4.4 Phénomène de pivotement de la cale.....	27
4.5 Passage de la roue par-dessus la cale	29

4.6	Phénomène de labourage de la cale.....	30
4.7	Phénomène d'expulsion de la cale	30
4.8	Principe d'énergie potentielle élastique dans l'analyse d'une cale	32
5.	CONCEPTION D'UNE CALE DE ROUE	33
6.	CRITÈRES DE CONCEPTION D'UNE CALE DE ROUE	37
6.1	Fonctions primaires des cales de roue pour camions ou semi-remorques.....	37
6.2	Fonctions secondaires des cales de roue pour camions ou semi-remorques.....	40
7.	DISCUSSION.....	43
8.	CONCLUSIONS.....	45
	BIBLIOGRAPHIE.....	47
	ANNEXE A.....	49
	Vidéo présentant le phénomène de rampement de la semi-remorque, c.-à-d. le "dock walking"	49

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Intégration des différents critères et contraintes à la conception pour cales de camions ou de semi-remorques, inspirés des normes MIL-PRF-32058 et A-A52475A.....	4
Tableau 2	Liste des causes pouvant mener à l'éloignement de la semi-remorque du quai.	13
Tableau 3	Modes de défaillance possibles d'une cale de roue.....	14
Tableau 4	Liste des contraintes à la conception pour cales de roue, version quantifiée.	38
Tableau 5	Fonctions primaires d'une cale de roue.	39
Tableau 6	Fonctions secondaires d'une cale de roue.	41

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Modèle de rampe simplifié du fonctionnement d'une cale de roue (adapté de Buchser, 1984).	6
Figure 2	Modèle géométrique de cale de roue aéronautique en contact avec un pneu sur une surface plane horizontale (adapté de Buchser, 1984).	6
Figure 3	Modèle géométrique de cale de roue aéronautique modélisée comme une marche ou un échelon (adapté de Buchser, 1984).	6
Figure 4	Données théoriques et expérimentales des tests effectués par Buchser (1984). Niveau de force de retenue lors de l'utilisation de cales 5", selon différents pneus (49" et 56"), différents avions (KC-135 et B-52), ainsi que différentes charges sur essieu.	8
Figure 5	Modèle de cale "engine run chock", schéma adapté de Buchser (1984).	10
Figure 6	Variation de la pente de la trajectoire de l'essieu en fonction de l'angle de rotation du pneu autour de la cale, pour un modèle de cale où le pneu est en contact avec un échelon, en supposant des composantes mécaniques ayant une raideur infinie.	12
Figure 7	Modèle géométrique schématisé d'une suspension de semi-remorque pour comprendre l'origine du phénomène de rampement: configuration initiale (en haut); entrée du chariot sur la plateforme (au centre); glissement des roues vers l'avant (en bas).	17
Figure 8	Illustrations de certains concepts provenant des banques de brevets canadiennes et américaines.	19
Figure 9	Illustrations de certains concepts provenant de la banque de données WIPO : EP1300305B1 (à gauche) et EP2292481 selon trois vues (à droite).	20
Figure 10	Modèle simplifié de cale en glissement pur.	24
Figure 11	Interaction d'un pneu de diamètre 56 pouces avec une cale aéronautique de cinq pouces de hauteur.	25
Figure 12	Cale de roue suggérée pour pneu 11R22.5.	26
Figure 13	Géométrie d'une cale aéronautique permettant d'éviter que la ligne de direction de la force de contact N soit postérieure à l'arête antérieure inférieure, en tout temps.	28
Figure 14	Diverses formes du champ d'énergie potentielle élastique créé par une cale en compression et en support sur son arête antérieure inférieure, en fonction de la rotation du pneu.	32
Figure 15	Caractéristiques de la cale proposée dans le cadre de la présente étude (unités en pouces et en degrés).	34

1. INTRODUCTION

Les cales de roues manuelles (communément appelées "wheel chocks" en anglais) constituent une aide à la sécurité qu'on utilise dans le domaine du transport, notamment pour les camions de pompiers, les avions ou les camions. De par sa simplicité, son coût abordable et sa mobilité, la cale apparaît a priori comme une solution intéressante pour sécuriser les véhicules à l'arrêt. Toutefois, devant la grande variabilité de cales retrouvées sur le marché, tant au regard de leurs géométries, des matériaux utilisés dans leur fabrication ou de leurs fonctions, il est opportun de déterminer si la performance de l'une ou l'autre de ces cales est suffisante pour assurer la sécurité des véhicules et de leur environnement. Idéalement, il serait même souhaitable de définir des critères de conception de cales qui assureraient une performance acceptable selon l'application visée.

L'objectif de la présente étude était de définir de tels critères de conception pour permettre une immobilisation sécuritaire des camions ou des semi-remorques¹ aux quais de chargement. Ce site est en effet reconnu pour être propice aux accidents impliquant des chariots élévateurs (Benoît et Bélanger, 1997; Bouliane et Dalière, 1986). En effet, le camion ou la semi-remorque² qui sont initialement positionnés pour recevoir la lèvre (ou le rabat) de la plateforme élévatrice de chargement, peut s'éloigner du quai et faire en sorte que la lèvre chute, faisant apparaître un vide dans lequel les roues du chariot vont s'introduire et mener éventuellement à son renversement. Cette problématique provient de l'un ou l'autre des cinq modes de défaillance des cales observés expérimentalement (Gauthier et al. 2006): glissement de la cale, pivotement, enfoncement dans le sol, écrasement de la cale ou passage de la roue par-dessus celle-ci. On peut aussi mentionner un mode de défaillance par expulsion antérieure ou latérale de la cale, lorsqu'elle est comprimée par la roue.

La littérature est pauvre en matière de critères de conception de cales de roues malgré le fait que ce dispositif de sécurité existe depuis plusieurs décennies. Par conséquent, avant de statuer sur des critères de conception, il est opportun d'analyser ce que les normes nous fournissent comme information à ce sujet. Cette analyse se retrouve à la section 2 du présent rapport technique. Par un recensement des écrits, la section 3 couvre les bases mécaniques du fonctionnement d'une cale de roue et permet ainsi, à la section 4, de définir notre propre concept de cale. La section 5 évalue la performance de la cale proposée au regard des différentes fonctions qu'un concept de cale de roue doit considérer. Finalement, une discussion permet de synthétiser et de contextualiser les différentes notions vues dans ce rapport. Les résultats de notre analyse démontrent qu'une cale de roue non ancrée au sol peut certainement contribuer à immobiliser le camion ou la semi-remorque aux quais, mais avec certaines limitations. Elle ne peut empêcher les départs inopinés, mais elle pourra contribuer à minimiser cet événement qui s'avère être critique pour un chariot élévateur.

¹ Un semi-remorque est un camion constitué d'une semi-remorque tirée par un tracteur.

² Une semi-remorque est une remorque rattachée au tracteur par sa partie antérieure. À l'arrêt, la semi-remorque est supportée antérieurement au sol par des béquilles.

2. NORMES RELATIVES AUX CALES DE ROUES

L'utilisation de cales de roues comme dispositif d'immobilisation des véhicules lourds est communément indiquée dans plusieurs normes nationales relatives à la sécurité dans le domaine du transport (p. ex. OHSA 1910.178(k) (1); ADR Para 8.1.5.2). Par contre, la plupart de ces normes s'abstiennent de définir quelconques critères de conception de cales de roues, mais elles mentionnent que la cale doit être compatible avec la masse du véhicule et la dimension du pneu.

On doit se référer à d'autres normes plus spécifiques sur les cales de roues pour retrouver certains critères de conception. Par exemple, la norme SAE J348 (1990-06) traite de critères de conception de cales de roues pour véhicules de surface à l'arrêt. Elle indique tout d'abord que la cale doit pouvoir supporter une charge en compression pouvant aller jusqu'à 14 000 kg, cette charge variant en fonction du rayon du pneu qui est en contact avec la cale. La géométrie du profil de la cale est aussi prescrite: une hauteur hors tout qui doit être environ à la mi-hauteur entre l'essieu et le sol, une largeur minimale équivalente au 3/4 de la largeur de la semelle du pneu et une longueur de 1,73 fois sa hauteur hors tout. La face en contact avec le pneu doit être orientée vers le haut, formant un angle entre 35° et 45° avec la base. Le test de performance proposé est une situation critique sur une pente maximale de 30 %, ou 16,7°. Cette condition expérimentale est obtenue en appliquant une charge verticale sur la roue de 5126 kg (valeur basée sur les charges maximales permises par le gouvernement aux États-Unis) et une charge horizontale sur l'essieu estimée à 10 433 kg, simulant ainsi une pente de 16,7° pour une charge totale du véhicule à retenir de 36 287 kg. Une seule cale est utilisée. Aucune autre information n'est fournie, notamment, sur le type de matériau, la masse, la couleur, les surfaces de contact, etc.

Dans le domaine de l'aviation, la norme SAE AIR3905 (2002) qui traite des cales est plutôt écrite sous forme de liste de considérations dans leur conception, sans prescription. La norme indique en effet que la conception et l'utilisation de cales de roues est une problématique beaucoup plus complexe qu'elle n'y paraît *a priori*. La norme indique, par exemple, de tenir compte du choix du matériau afin de considérer des dégradations potentielles de leurs performances, ou de leur structure dues à des facteurs environnementaux tels la température, le soleil, les moisissures, le sable, la poussière, la neige et la glace, le sel, l'essence, les huiles ou fluides hydrauliques et les solvants. En ce qui a trait à la géométrie de la cale, des hauteurs entre 6 et 12 pouces sont proposées en fonction de la dimension des pneus. La masse de la cale, bien que non définie, doit être limitée afin de faciliter sa manutention, mais elle doit tout de même être suffisante pour empêcher les cales d'être déplacées sous l'effet des vents naturels ou provenant des turbines. Divers autres aspects pratiques sont aussi mentionnés, mais aucun critère précis de conception n'est prescrit. Seuls des exemples de géométries typiques sont illustrés, la plupart ayant une face de contact avec le pneu qui est à 45° de l'horizontale.

La directive A-A52475A (1993) de la défense américaine est dédiée aux fournisseurs de cales de camions ou de remorques pour leur immobilisation et est beaucoup plus spécifique: elle prescrit des dimensions précises de cales, exige une surface de cale en contact avec le pneu qui possède un rayon compatible avec les rayons de roues moyens disponibles commercialement, et requiert que les arêtes de la cale soient arrondies de sorte qu'elles ne puissent blesser un individu ou abimer un pneu. Cette directive classe les cales selon trois types: type I, II et III. Le type I est

fabriqué de bois dur laminé (érable, chêne rouge ou blanc), chaque couche ayant une épaisseur minimale de 32 mm. Le type II est soit fabriqué de matériaux élastomères tels le caoutchouc vulcanisé, l'uréthane, les laminés de caoutchouc, soit fabriqué en bois dur laminé de 32 mm d'épaisseur minimale par couche. Le type III doit être fabriqué de métal non-ferreux moulé ou extrudé, tel l'aluminium qui a l'avantage de ne pas causer d'étincelles. Les dimensions suggérées varient en fonction du type de cale. Par exemple, pour la cale de type III, elles sont de 6 à 10 pouces de hauteur (165 à 254 mm), de 7,5 à 11,7 pouces de longueur (191 à 298 mm) et elles ont une largeur variant entre 6 et 8 pouces (152 et 203 mm). Les cales de type I et II viennent avec des chaînes faisant office de câbles pour des fins d'entreposage et de manutention, et pour permettre de retirer la cale lorsqu'elle reste coincée sous le pneu.

Finalement, le Department of Air Force aux États-Unis a approuvé la norme MIL-PRF-32058 en juin 2003 relativement aux performances des cales et à leur fabrication. La norme exige des cales de type II ayant une masse en-deçà de 35 lb ou 16 kg. Contrairement à la norme précédente, la cale de type I doit être fabriquée de bois mou tels le pin (de l'Ouest, nordique, blanc, à sucre ou jaune des Rocheuses), ou le sapin (Douglas ou blanc). D'autres bois mous peuvent être utilisés mais avec acceptation des officiels concernés. Les cales de type II sont fabriquées de matériaux autres que ceux du type I. Il est indiqué que les autres matériaux utilisés ne doivent pas créer d'étincelles lors de leur utilisation, ni se briser en morceaux, ou encore devenir contaminés ou dégradés par les fluides des avions. Si la cale incorpore des pointeaux ou des aspérités pour la stabiliser au sol, les matériaux prohibés ne doivent pas être utilisés. Des surfaces anti-moisissures sont de plus exigées ainsi qu'un fini de surface et une peinture typiques au domaine. Une chaîne (ou câble) est aussi exigée pour les deux types de cales, d'une longueur variant selon la grosseur de la cale. La cale de type II doit, de plus, ne pas flotter dans l'eau et résister à une charge en compression de 630 psi (4,3 MPa). Les deux types de cales doivent résister à un environnement de -60 à 180 °F, à une exposition à 100 % de taux d'humidité, à une exposition aux ultraviolets et pouvoir être inspectés à l'intérieur de 30 minutes par une seule personne. Pour des pneus de diamètre plus grand que 33 pouces (et donc qui se rapprochent des pneus de semi-remorques), les dimensions demandées sont: largeur de 36 pouces³, hauteur minimale de 6 pouces et longueur minimale (direction antéro-postérieure) de 8 pouces. La longueur de la chaîne rattachée à la cale doit alors être de 92 pouces.

Le Tableau 1 présente un résumé des différents critères que les normes ci-dessus proposent et qui représentent de l'intérêt pour la présente étude. Ces critères se divisent en cinq catégories: environnement, ergonomie, sécurité, dimension et matériau/mécanique.

³ Puisque les cales pour les avions sont très larges, le terme longueur utilisé dans la norme représente en fait la largeur de la cale dans ce rapport, i.e. la dimension qui est selon la direction transverse des pneus.

Tableau 1 Intégration des différents critères et contraintes à la conception pour cales de camions ou de semi-remorques, inspirés des normes MIL-PRF-32058 et A-A52475A.

Type de critère	Critère	Valeur minimale	Valeur maximale	Valeur cible mentionnée
Environnement	Résistante aux rayons ultraviolets	à définir	à définir	à définir
	Fonctionnelle dans une large gamme de températures	-60°F	180°F	à définir
	Fonctionnelle malgré la présence de pluie, neige, glace, sable, sel	à définir	à définir	à définir
	Ne flotte pas dans l'eau	Densité moyenne supérieure à l'eau	à définir	à définir
	Résistante aux moisissures	à définir	à définir	à définir
Ergonomie	Couleur conforme aux normes du milieu d'utilisation	à définir	à définir	à définir
	Masse	à définir	à définir	16 kg (35 lb)
	Arêtes arrondies	à définir	à définir	à définir
	Visibilité	à définir	à définir	à définir
	Présence d'un câble ou d'une chaîne rattachée à la cale	-	-	longueur normalisée
	Entreposable	à définir	à définir	à définir
Sécurité	Ne produit pas d'étincelles lors d'un glissement ou impact au sol	-	-	ne produit pas d'étincelles
	Inspection rapide	à définir	à définir	30 minutes
	Chaîne attachée au quai pour ne pas perdre les cales ou éviter leur expulsion	-	-	à définir
Dimension	à déterminer			variable selon la norme
Matériau-Mécanique	Résistante aux huiles, eau et produits présents sur les lieux d'utilisation (essence, huile de transmission, à frein, etc.)	à définir	à définir	à définir
	Résistante aux chocs (p. ex. test de chute au sol)	à définir	à définir	à définir
	Résistante à l'écrasement	à définir	à définir	14 000 kg

3. RECENSEMENT DES ÉCRITS

Le recensement des écrits s'est concentré sur les différentes banques de données suivantes: Compendex, Pubmed, Ergonomics Abstracts, OSHLine, OSH Update, Google Scholar et National Technical Information Service (NTIS). Outre des descriptions de cas d'accidents associés à des cales, ou des textes de magazines spécialisés sur l'importance ou non d'utiliser des cales et de leur sélection, la littérature scientifique s'est jusqu'ici peu penchée sur ce dispositif de sécurité. En fait, un seul article scientifique ainsi que deux rapports techniques particulièrement bien documentés ont été répertoriés et sont décrits ci-dessous. Une revue des brevets canadiens et américains a aussi été effectuée, mais n'a pas fourni de critères de conception spécifiques.

3.1 Publications scientifiques

Le seul article scientifique répertorié décrit une étude récente de Li *et al.* (2009) qui visait à déterminer le positionnement d'un des deux tubes transverses qui forment la surface de contact d'une cale qui est en contact avec le pneu d'un avion B737-800. Le tube inférieur étant positionné près du sol, *a priori*, le deuxième tube devait être positionné relativement au premier afin de maximiser la force de retenue de la cale, sans glissement au sol. Un modèle du pneu a été élaboré par éléments finis avec le logiciel ANSYS en utilisant un matériau hyper élastique basé sur le modèle de Mooney-Rivlin. Ce modèle a été étalonné en utilisant des données géométriques de pneus sous charge d'un avion à vide ou en charge maximale au décollage. Cette étude a démontré que le deuxième tube devrait se situer dans une région antérieure au premier tube afin de créer une surface virtuelle de contact qui se trouve à environ 40° - 45° par rapport à l'horizontale.

3.2 Rapport technique de la défense américaine

3.2.1 Résultats fournis

Ce premier rapport technique a été publié par l'armée américaine en 1984 afin de déterminer une cale de roue optimale pour les avions B-52 et KC-135 (Buchser, 1984). La problématique était que la cale standard de cinq pouces de haut était performante sous plusieurs conditions d'opération au sol, mais qu'elle était incapable de retenir ces gros aéronefs lorsque les moteurs étaient lancés à pleine capacité. Des études théoriques et expérimentales ont été entreprises pour définir de nouveaux critères de conception de cales afin d'améliorer leurs capacités de retenue.

L'approche scientifique qui a été prise était d'établir premièrement un modèle théorique simplifié de la cale et de le valider avec des données expérimentales qui, selon notre compréhension du rapport, découlent de tests effectués en laboratoire et non sur le terrain. En fait, deux modèles théoriques ont été élaborés. Le premier modèle, illustré à la Figure 1, est une simple rampe ayant un angle ϕ par rapport à l'horizontale. Un diagramme du corps libre de la roue permet de déterminer la force maximale de tire T appliquée à l'essieu avant que la roue ne monte la rampe, pour une charge gravitationnelle W appliquée sur l'essieu. On trouve facilement que

$$T = W \tan \phi \quad (1)$$

pour obtenir un équilibre statique.

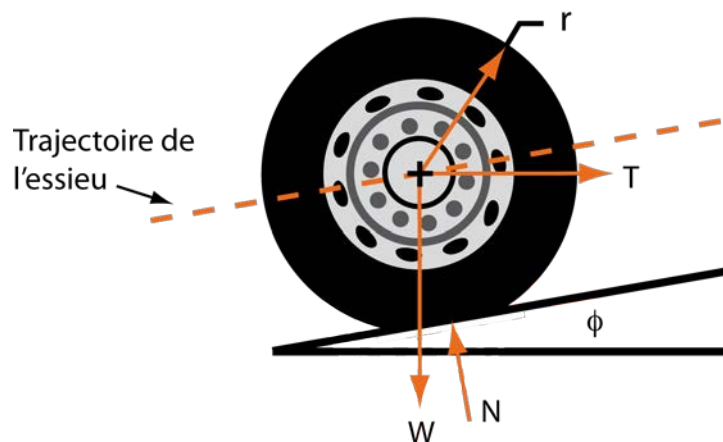


Figure 1 **Modèle de rampe simplifié du fonctionnement d'une cale de roue (adapté de Buchser, 1984).**

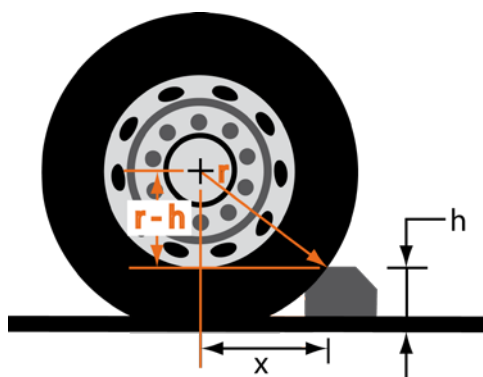


Figure 2 **Modèle géométrique de cale de roue aéronautique en contact avec un pneu sur une surface plane horizontale (adapté de Buchser, 1984).**

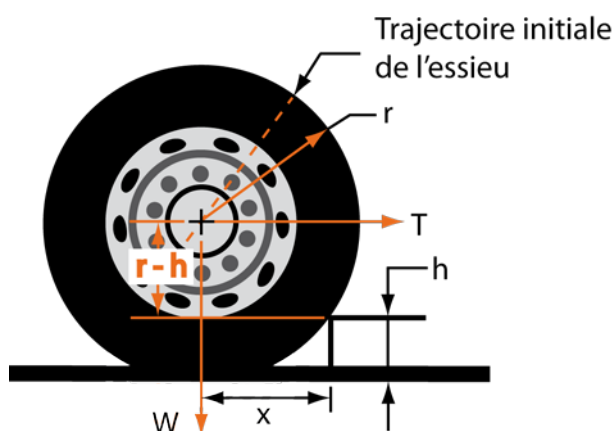


Figure 3 **Modèle géométrique de cale de roue aéronautique modélisée comme une marche ou un échelon (adapté de Buchser, 1984).**

Les auteurs suggèrent alors que l'angle ϕ peut être trouvé en considérant la Figure 2 où une géométrie de cale aéronautique réelle est illustrée. Il suffit d'abord de calculer la distance horizontale x du point de contact de la cale avec le pneu jusqu'au point de contact du pneu avec le sol, donnée par:

$$x = [h(2r - h)]^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

où h est la hauteur de l'arête de la cale qui fait un premier contact avec le pneu, et r , le rayon du pneu.

L'angle ϕ est alors approximé par:

$$\phi = \tan^{-1} \frac{h}{x}. \quad (3)$$

En remplaçant l'équation (2) dans l'équation (3), l'angle ϕ devient:

$$\phi = \tan^{-1} \frac{h}{[h(2r - h)]^{\frac{1}{2}}}. \quad (4)$$

La trajectoire suivie par l'essieu lorsque le pneu est mis en mouvement sur la rampe est illustrée à la Figure 1.

On peut supposer un deuxième modèle alternatif pour la cale tel qu'illustré à la Figure 3. Il est constitué d'un pneu en contact avec un échelon, *c.-à-d.* une marche. Dans ce cas, la cale suit une trajectoire initiale différente du premier modèle et la force de traction T nécessaire pour faire passer la roue par-dessus la cale est maintenant donnée par:

$$T = \frac{W \cdot x}{r - h} \quad (5)$$

En remplaçant l'équation (2), qui demeure valide, dans l'équation (5), la force de traction T devient:

$$T = \frac{W [h(2r - h)]^{\frac{1}{2}}}{r - h}. \quad (6)$$

Ces deux modèles ne tiennent cependant pas compte des déformations du pneu, de la suspension et de la cale. Afin de déterminer lequel de ces deux modèles est le plus près de la réalité, des tests de laboratoire ont été effectués sur des pneus du Boeing KC-135, de 49 pouces de diamètre (Buchser, 1984). Ils ont démontré que le modèle théorique de rampe sous-estime les efforts de traction pour des charges plus faibles, mais les surestime légèrement pour de plus grandes charges, tel qu'illustré à la Figure 4. Selon les calculs de Buchser (1984), le modèle théorique de cale où le pneu est en contact avec un échelon introduit des erreurs beaucoup plus grandes, de l'ordre de 38 à 171 %. Les résultats pour des pneus de 56 pouces du B-52 sont similaires: le modèle de rampe se rapproche plus de la réalité que le modèle avec un échelon.

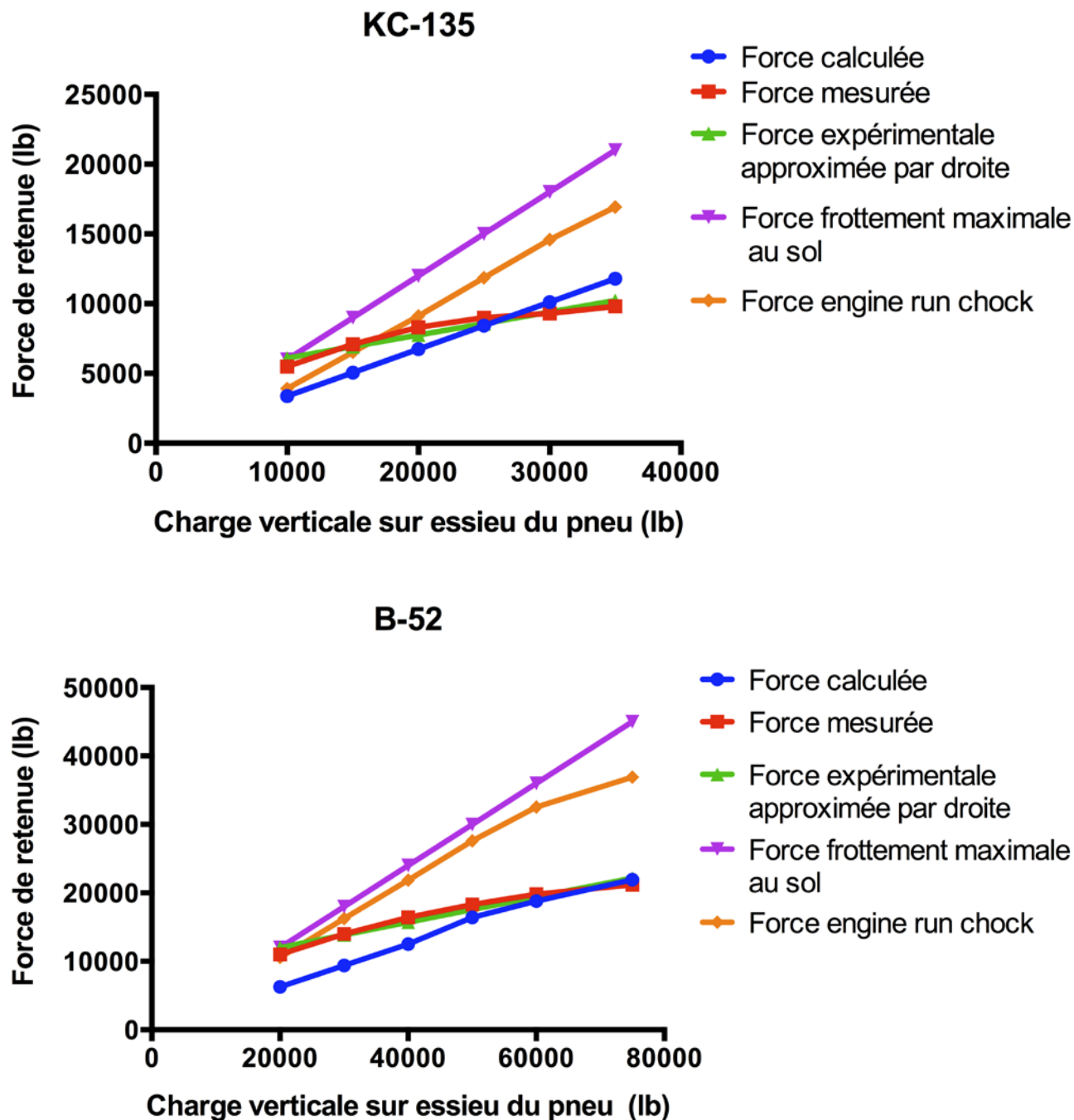


Figure 4 Données théoriques et expérimentales des tests effectués par Buchser (1984). Niveau de force de retenue lors de l'utilisation de cales 5", selon différents pneus (49" et 56"), différents avions (KC-135 et B-52), ainsi que différentes charges sur essieu.

Les résultats de la cale "engine run chock" sont aussi présentés. Les courbes de force de retenue illustrées sont les courbes théorique (Force calculée avec un modèle de rampe), expérimentale (Force mesurée), et les régressions linéaires des résultats expérimentaux (Force expérimentale approximée), qui sont comparées à la courbe de frottement maximum au sol, en supposant un coefficient de 0,6 (Frottement sol).

L'auteur a comparé les résultats de force de retenue pour une cale de 1,5 pouce plus haute et a découvert que la force de retenue augmentait d'environ 17 % par rapport à la cale de cinq pouces. De plus, l'auteur a conçu une cale de géométrie plus complexe ("engine run chock") qui s'est montrée plus performante pour des charges élevées, mais de performance moindre ou équivalente pour des charges plus basses sur le pneu, tel qu'observé dans les résultats de la Figure 4. Cette cale est illustrée à la Figure 5. La face postérieure de la cale possède un rayon de courbure mitoyen entre les deux pneus testés, c.-à-d. des pneus ayant des diamètres de 49 et 56 pouces.

3.2.2 Analyse des résultats fournis

Selon Buchser (1984), les cales de 5" de hauteur sont reconnues comme celles qui ne démontrent aucun glissement au sol pendant leur utilisation. Les résultats présentés à la Figure 4 démontrent ce fait, car les courbes expérimentales sont sous la courbe de frottement de coefficient 0,6. En fait, les cales utilisent une faible proportion de la capacité en frottement du sol, car les régressions linéaires des courbes expérimentales indiquent des pentes de 0,16 et 0,18 pour les pneus 49" et 56" respectivement. Ces pentes, trois fois plus faibles que le coefficient de frottement au sol, s'expliquent par les déformations importantes des pneus qui induisent des non-linéarités dans les résultats. En effet, à bas niveau de charge, la pente est plutôt de l'ordre de 0,3.

Les résultats présentés par Buchser (1984) fournissent des données inédites pour déterminer si des cales de 5" pourraient contribuer à retenir un camion ou un semi-remorque au quai. Si la cale était positionnée sur un des pneus arrière de la suspension de la semi-remorque, la charge verticale maximale à laquelle elle pourrait être soumise ne dépasserait pas 5 000 kg (ou 11 000 lb) car les normes routières québécoises (MTQ, 2005) stipulent que chaque essieu peut supporter jusqu'à 9 000 kg. Or, pour une charge de 10 000 kg appliquée sur l'axe d'un pneu d'un avion KC-135, Buchser (1984) a mesuré des forces de résistance des cales de 2 495 kg (5 500 lb) maximum. Une telle force de résistance ne serait pas suffisante pour prévenir l'avancement d'un semi-remorque. En effet, sachant que la masse combinée d'un tracteur et de sa semi-remorque chargée s'élève à environ 45 000 kg (ou 100 000 lb) et que le tracteur doit être capable de faire avancer cette charge sur des pentes d'au moins 10 % (c.-à-d. 5,7°), sa capacité de traction est donc d'au moins 4 500 kg (9 000 lb), i.e., bien au-delà de ce qu'une cale pourrait produire.

En réalité, un tracteur est en mesure de fournir une force de traction au-delà de cet estimé conservateur. En effet, Gauthier *et al.* (2006) ont évalué qu'un tracteur pourrait tirer autant que 15 300 kg (33 660 lb). Par conséquent, une seule cale ne pourrait retenir un tracteur qui quitte le quai, en particulier si la semi-remorque est allège. L'utilisation de plusieurs cales aiderait, mais pas suffisamment, et cela impliquerait des problématiques techniques non négligeables. Même la cale "engine run chock", proposée par Buchser, serait insuffisante. La régression linéaire des données du "engine run chock" indique une pente d'environ 0,6, de sorte que la force de retenue resterait toujours trop faible, à 3 000 kg (6 612 lb). Il est intéressant de noter que la force de résistance de la "engine run chock" de Buchser se rapproche ainsi d'une interface de frottement avec coefficient de frottement de 0,6.

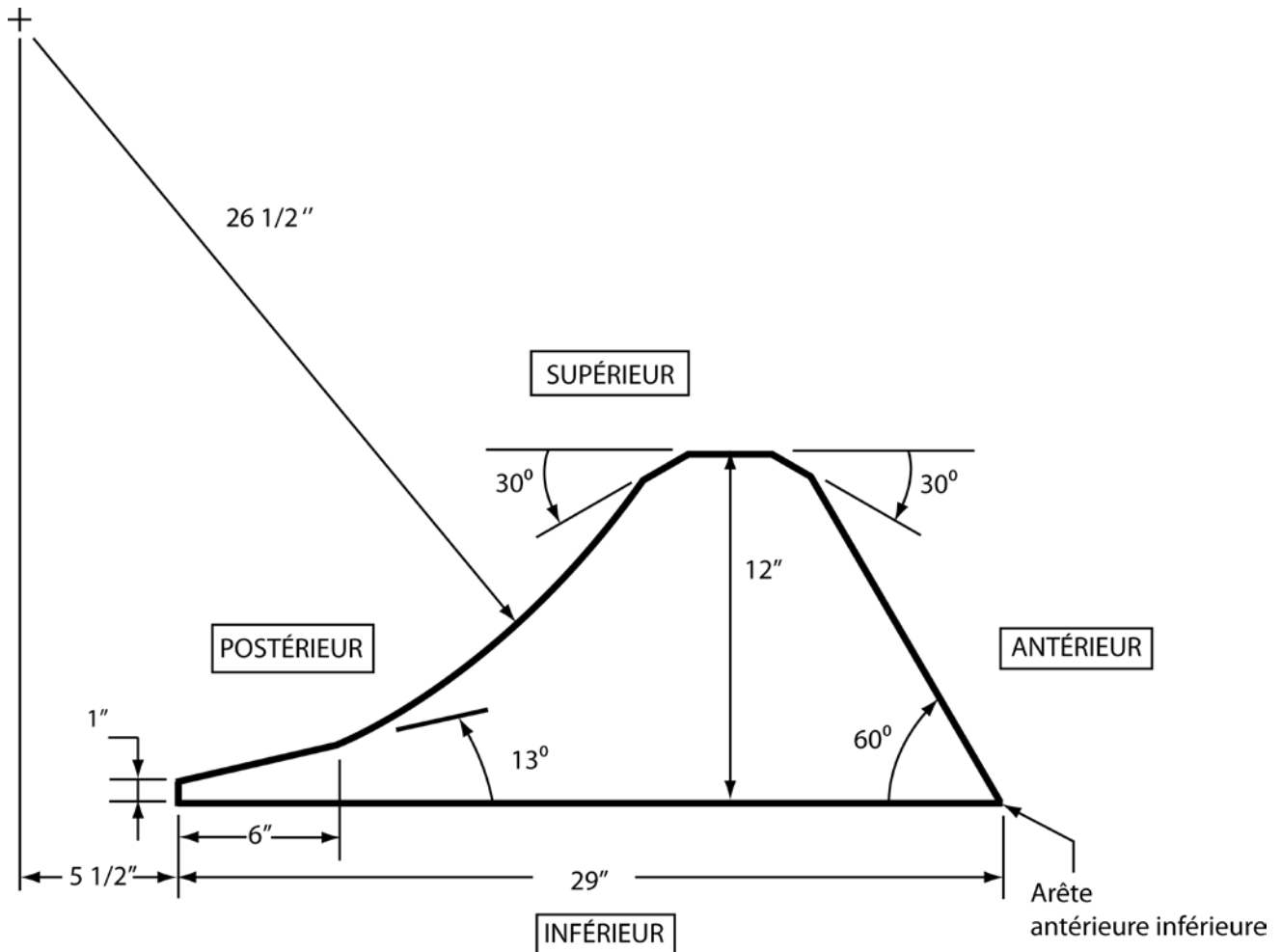


Figure 5 Modèle de cale "engine run chock", schéma adapté de Buchser (1984).

3.2.3 Analyse énergétique des modèles développés par Buchser (1984)

Il est utile à ce point de développer les modèles de résistance précédents en utilisant une approche énergétique, au lieu d'une approche statique. Cette approche permet en effet de mieux comprendre les impacts de la déformation des structures en jeu lors de l'évaluation de la capacité de retenue de la cale. L'approche consiste à calculer le gain en énergie potentielle ΔV du système qui comprend le sol, la cale, le ou les pneus, la suspension, le camion ou la semi-remorque qui tentent de rouler sur la cale. Si on veut une cale qui soit en mesure de retenir le camion ou la semi-remorque, il faut que le travail U , effectué par la force de traction du tracteur, soit inférieur ou égal à ce gain d'énergie potentielle ΔV , c.-à-d.

$$U \leq \Delta V = \Delta V_e + \Delta V_g \quad (7)$$

où ΔV_e est le changement d'énergie potentielle élastique et ΔV_g , le changement d'énergie potentielle gravitationnelle. Dans le cas où les sous-systèmes en jeu sont infiniment rigides, $\Delta V_e = 0$, de sorte que la condition de l'équation (7) devient:

$$Tdx \leq Wdy \quad (8)$$

où dx représente le mouvement horizontal infinitésimal de l'essieu du camion ou de la semi-remorque et dy , son mouvement vertical. La condition pour qu'une cale soit en mesure de retenir le camion ou la semi-remorque tirée par le tracteur se simplifie donc à:

$$T \leq W \frac{dy}{dx} \quad (9)$$

où la dérivée dy/dx représente la pente de la trajectoire suivie par l'essieu lorsque le pneu tente de rouler sur la cale. Puisqu'on connaît la trajectoire suivie par l'essieu pour des sous-systèmes infiniment rigides, il est possible de calculer cette condition pour les deux cas de modèles simplifiés suggérés par Buchser (1984). Ainsi, pour le modèle de rampe, la trajectoire de l'essieu dans le plan vertical est une droite avec une pente ϕ de sorte que $\tan \phi = dy/dx$, et la condition de l'équation (9) devient:

$$T \leq W \tan \phi, \quad (10)$$

identique à celle retrouvée à l'équation (1). On peut démontrer facilement, si on analyse la Figure 3, que pour le modèle simplifié d'échelon, la pente de la trajectoire est maximale au contact initial et l'approche énergétique nous mène à la même condition que celle énoncée à l'équation (6). Si on illustre la pente de la trajectoire pour différentes positions du pneu en contact avec la cale (Figure 6), on observe ainsi que la pente est maximale au début du contact mais devient progressivement nulle à mesure que le pneu monte sur la cale. Ainsi, pour une cale de hauteur donnée, plus le pneu possède un diamètre élevé, moins la pente initiale de la trajectoire de l'essieu sera élevée. L'équation (9) est fondamentale dans l'analyse des capacités de retenue d'une cale. Cette équation nous indique que la capacité de retenue d'une cale est intimement reliée à la trajectoire que suivra l'essieu pendant le mouvement de la roue, et donc, dans une majeure partie, au profil géométrique de la cale et aux déformations des structures en jeu.

L'impact de la déformation des structures en jeu est de réduire la pente de la trajectoire par rapport au cas où les sous-systèmes sont infiniment rigides; ils ne pourront jamais l'augmenter. La prédiction de cette réduction de pente implique des calculs complexes des déformations du sol, de la cale, du pneu et de la suspension. Il est donc difficile de prédire exactement la capacité de retenue d'une cale. Il est beaucoup plus précis de l'évaluer expérimentalement en mesurant la trajectoire de l'essieu du pneu lorsque le pneu roule sur la cale.

Il est intéressant de noter que cette analyse énergétique simplifiée nous instruit sur un point important: celui de l'énergie cinétique initiale du camion sur la capacité de retenue d'une cale. En effet, si une certaine quantité d'énergie cinétique est emmagasinée dans le camion avant qu'il ne roule sur la cale, cette énergie peut faire en sorte de dépasser la région de contact initial et ainsi se retrouver dans une situation où la pente de la trajectoire est plus faible et, par conséquent, où la cale produit moins de capacité de retenue. Il est donc important de s'assurer de minimiser l'énergie cinétique qu'un camion peut emmagasiner avant de rouler sur une cale sinon le camion risquerait de passer par-dessus celle-ci.

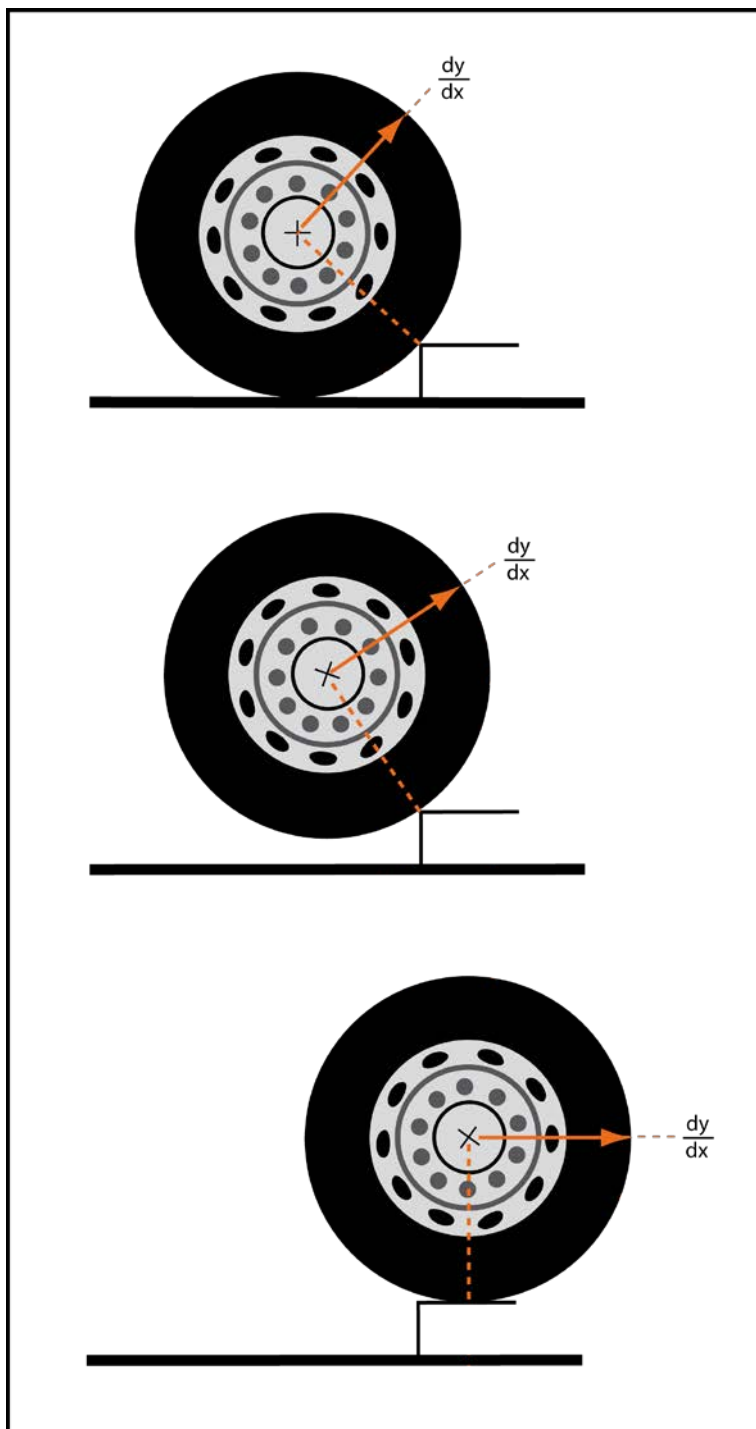


Figure 6 Variation de la pente de la trajectoire de l'essieu en fonction de l'angle de rotation du pneu autour de la cale, pour un modèle de cale où le pneu est en contact avec un échelon, en supposant des composantes mécaniques ayant une raideur infinie.

3.3 Rapport technique de l'IRSST sur les cales de roues

3.3.1 Résultats fournis

Le deuxième rapport technique retrouvé dans la littérature a été publié par l'IRSST en 2006 (Gauthier *et al.* 2006). Cette étude visait en partie à évaluer la performance de cales de roue existantes, d'un point de vue théorique et expérimental. À cet effet, des tracteurs avec semi-remorque étaient utilisés en situation réelle pour déterminer si la cale permettait de maintenir la semi-remorque en place à la suite d'un départ inopiné du tracteur ou d'un freinage d'un chariot élévateur dans la semi-remorque.

L'étude de Gauthier *et al.* (2006) a d'abord permis de déterminer les causes qui pourraient mener à l'éloignement de la semi-remorque du quai et, ainsi, à la chute de la lèvre. Ces causes, listées au Tableau 2, sont expliquées dans leur rapport et elles doivent être prises en compte par tout système de sécurité visant à retenir une semi-remorque au quai. Brièvement, la première cause qui serait la plus fréquente est le départ inopiné du camion. La deuxième est le fait que les chariots élévateurs peuvent freiner lorsqu'ils se retrouvent sur la plateforme de la semi-remorque, créant une force de perturbation longitudinale sur la plateforme pouvant soit faire basculer la semi-remorque sur ses béquilles avant, soit la faire glisser au sol, ou encore de mener à la défaillance ou la déformation plastique des béquilles avant. Une troisième cause est l'entrée et la sortie d'un chariot de la semi-remorque faisant en sorte que, selon la géométrie de la suspension, la semi-remorque rampe progressivement loin du quai. Finalement, les études expérimentales effectuées par ce groupe ont permis de visualiser, par vidéo, six modes de défaillances fonctionnelles de cales, présentés au Tableau 3.

Tableau 2 Liste des causes pouvant mener à l'éloignement de la semi-remorque du quai.

Problématique	Effets possibles	Performance des cales (Gauthier <i>et al.</i> 2006)	Validation
Départ inopiné du camion	Éloignement de la semi-remorque du quai	Une seule cale a réussi le test, celle-ci étant supportée par une surface métallique avec rainures et pour de lourdes charges seulement	Expérimentale
Freinage des chariots dans la semi-remorque	Éloignement progressif de la semi-remorque du quai; basculement de la semi-remorque sur béquilles avant; déformation plastique ou défaillance des béquilles avant	Aucun glissement de la semi-remorque, même sur une pente de 10°, à moins que le sol soit glacé. NOTE: les freins étaient en fonction.	Expérimentale et théorique: coefficient de frottement pneu-bois = 0,7; coeff. béquille-sol=0,65; coeff. pneu-sol = 0,55-0,85; Dans tous les cas, une chaussée enneigée diminue le coefficient à 0,15.
Entrée et sortie du chariot	Rampement progressif de la semi-remorque	Rampement possible	Théorique

Tableau 3 Modes de défaillance possibles d'une cale de roue.

Mode de défaillance	Description	Visualisation
A	Roue passe par-dessus la cale	The visualization column contains a single large box with six sub-diagrams labeled A through F, each showing a wheel and a chock on a blue ground surface. A: A wheel is shown rolling over the top of a chock, with an arrow indicating forward motion. B: A wheel is shown moving from a grey chock to a black chock, with a dashed arrow indicating the movement of the chock. C: A wheel is shown pivoting on the front edge of a chock, with an arrow indicating forward motion. D: A wheel is shown pulling a chock into the ground, with an arrow indicating forward motion. E: A wheel is shown crushing a chock, with an arrow indicating forward motion. F: A chock is shown being pushed laterally by a wheel, with an arrow indicating the direction of lateral movement.
B	Glissement de la cale au sol	
C	Pivotement sur arête antérieure de la cale	
D	Labourage de la cale dans le sol	
E	Écrasement de la cale	
F	Déstabilisation latérale de la cale avec expulsion	

3.3.2 Analyse des résultats fournis

Le départ inopiné du camion a été discuté plus tôt et l'incapacité d'une cale à le retenir a été démontrée, à moins, évidemment, que la cale ne soit ancrée au sol et que sa géométrie soit adéquate. Le freinage des chariots élévateurs dans la semi-remorque est une situation qui n'apparaît pas problématique selon Gauthier *et al.*, (2006), en se basant sur certains calculs simplifiés de dynamique et selon les tests expérimentaux qu'ils ont effectués. Deux facteurs affectent en fait ce phénomène: le rapport des coefficients de frottement « semi-remorque/sol » et « chariot/plateforme de la semi-remorque », et le ratio « masse du chariot/masse totale (chariot + semi-remorque) ».

Ceci peut être démontré en effectuant un diagramme du corps libre de la semi-remorque. Dans le cas critique où le chariot élévateur freine jusqu'au glissement sur la plateforme, il n'y aura pas de glissement de la semi-remorque au sol, si la force de frottement transmise à la plateforme par le chariot élévateur ne dépasse pas la force de frottement maximale possible à l'interface semi-remorque/sol. Ceci s'exprime mathématiquement par la relation:

$$\mu_{plateforme} m_{chariot} g \leq \mu_{sol} (m_{chariot} + m_{plateforme}) g, \quad (11)$$

avec g , la constante gravitationnelle, $m_{chariot}$ et $m_{plateforme}$, respectivement les masses du chariot et de la plateforme, et $\mu_{plateforme}$ et μ_{sol} , respectivement les coefficients de frottement du chariot avec la plateforme et celui de la plateforme avec le sol.

Après simplification, on obtient la condition de non-glissement au sol donnée par:

$$\frac{\mu_{plateforme} m_{chariot}}{\mu_{sol} (m_{chariot} + m_{plateforme})} \leq 1. \quad (12)$$

Notons que le coefficient de frottement de la semi-remorque au sol n'est pas unique, car il comprend des contacts béquilles-sol et pneus-sol. Cependant, puisque les coefficients de frottement de ces deux interfaces ne sont pas très différents, on peut les considérer comme étant équivalents. Sachant alors que le rapport de masse de l'équation (12) est nécessairement plus petit que un, approchant environ la moitié dans le cas d'une semi-remorque non chargée, le rapport des coefficients de frottement plateforme/sol doit donc être de l'ordre de deux pour qu'il y ait glissement au sol. À moins d'avoir des conditions d'enneigement et de glace, cette situation ne se produira pas.

L'analyse ci-haut suppose par contre que les freins des roues sont fonctionnels et en opération. Si ce n'est pas le cas, ou si les freins ne suffisent pas à bloquer les roues et tirer profit de leur capacité de frottement au sol, la semi-remorque pourrait s'éloigner du quai lors du freinage du chariot.

Pour ce qui est du phénomène de rampement de la semi-remorque, Gauthier *et al.* (2006) ont expliqué géométriquement le phénomène, mais ils n'ont pas fourni le modèle permettant de

déterminer s'il y a glissement ou non. L'extrait vidéo qui se retrouve à l'annexe A permet de visualiser l'effet du rampement, illustré à l'aide d'un véhicule roulant rudimentaire. Une cale placée aux roues arrière ne permettra pas d'éviter ce phénomène. En effet, lorsque le chariot arrive sur la plateforme de la semi-remorque, la charge globale de la semi-remorque augmente. La charge principale étant située en arrière de la remorque, celle-ci est reprise en grande partie par les roues. La suspension de la semi-remorque s'écrase (Figure 7 en haut et au centre), ce qui a pour effet de faire pivoter le bras de suspension d'un angle θ et d'entraîner le glissement au sol des béquilles dans la direction antérieure (c.-à-d. vers le tracteur). Ce sont les béquilles qui glissent au sol et non les roues parce que la charge reprise par les béquilles est le plus souvent inférieure à celle prise par les roues arrière étant donné le positionnement arrière du chariot lors de son entrée. Ainsi, à coefficient de frottement égal par exemple, il est évident que la capacité de frottement au sol des béquilles sera inférieure et que l'accroissement de la distance entre les roues et les béquilles sera rendu possible uniquement par un glissement des béquilles au sol.

Lorsque le chariot se déplace vers l'avant de la remorque (Figure 7 en bas), la charge est transférée graduellement vers l'avant et la force normale aux béquilles augmente aussi graduellement tout comme leur capacité de résistance au glissement au sol. La suspension se détend alors peu à peu, forçant un retour du bras de suspension vers sa position initiale et, ainsi, le rapprochement des béquilles et des roues par glissement au sol. Puisque le chariot se trouve situé vers l'avant, la résistance au frottement des béquilles avec le sol devient cette fois supérieure à celle des roues arrière de sorte que ce sont maintenant les roues qui vont glisser au sol antérieurement, à moins que le coefficient de frottement soit largement inférieur au sol au niveau des béquilles par rapport à celui au niveau des roues. Au global, il en résulte un déplacement net vers l'avant de la semi-remorque à chaque fois que le chariot circule au-dessus de la suspension.

Ce type de mouvement ne peut être empêché par le système de freinage, car c'est la capacité relative de frottement au sol des béquilles par rapport à celle des roues qui détermine ce comportement. De plus, il ne peut être évité par une cale non fixée au sol. En effet, en considérant que le coefficient de frottement cale-sol est similaire à celui pneu-sol et que le sol est indéformable, la cale n'affecte pas la capacité de reprendre des efforts par frottement au sol parce que la force normale avec ou sans cale est d'un même ordre de grandeur. De plus, la cale ne peut fournir de résistance que si la roue transfère sa charge sur la cale en roulant sur celle-ci. Puisqu'un pneu bloqué qui glisse au sol vers une cale la fera patiner à son tour, à moins qu'elle ne soit fixée, la cale ne peut contribuer à minimiser la problématique de rampement de la semi-remorque.

Toutefois, l'analyse précédente suppose les hypothèses suivantes:

1. La plateforme et les autres éléments ne se déforment pas;
2. Le pneu ne se déforme pas;
3. Les roues sont bloquées par le système de freinage.

Le calcul théorique du phénomène de rampement sans les hypothèses citées ci-haut nécessite des modélisations complexes de la déformation de la semi-remorque, des capacités en cisaillement des pneus et des déformations des différents éléments qui composent la suspension. Ces

modélisations permettraient certes de déterminer la grandeur du déplacement causé par le rampement. Par contre, celles-ci n'apporteraient pas d'information supplémentaire en ce qui a trait à l'efficacité de la cale pour empêcher ce type de mouvement.

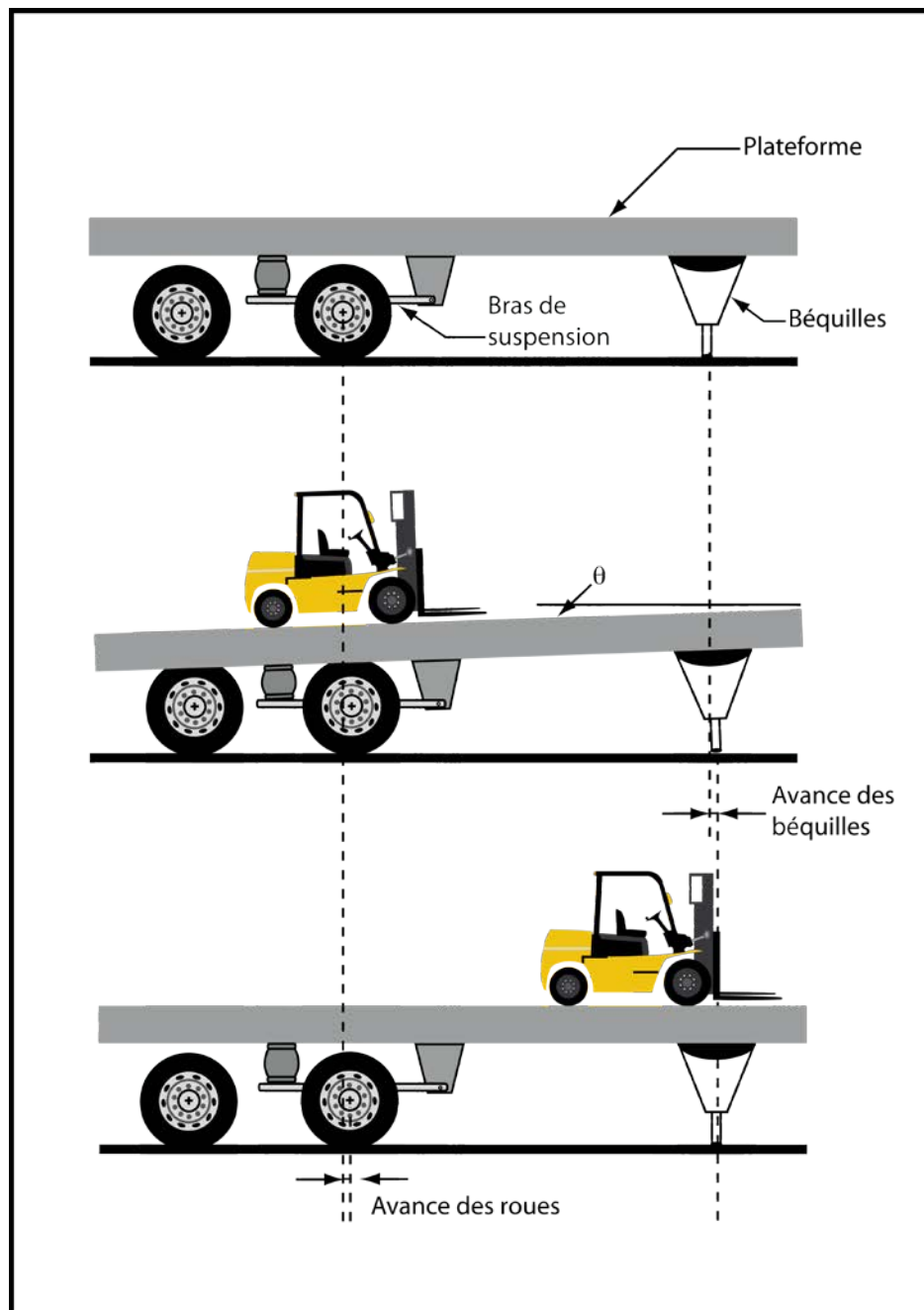


Figure 7 Modèle géométrique schématisé d'une suspension de semi-remorque pour comprendre l'origine du phénomène de rampement: configuration initiale (en haut); entrée du chariot sur la plateforme (au centre); glissement des roues vers l'avant (en bas).

3.4 Recherche de brevets

La recherche de brevets a été effectuée essentiellement dans les bases de données canadiennes et américaines en cherchant les mots clés "wheel chock" dans les titres des brevets. Un bon nombre de brevets de design industriel ont été publiés et quelques brevets de cales de roues sont présentés. Cependant, la plupart d'entre eux s'attardent à des caractéristiques spécifiques et un nombre restreint fournit des explications détaillées sur le fonctionnement des cales. Plusieurs s'intéressent à l'ajout de composantes pour faciliter l'entreposage, la manutention ou pour améliorer le frottement avec le sol. La Figure 8 illustre certains concepts présentant un intérêt pour notre étude. La Figure 9 en présente deux de plus qui proviennent d'une recherche partielle dans la base de données de la World Intellectual Property Organisation (WIPO). Le premier (EP1300305B1) est basé sur une série de structures tubulaires qui permet ainsi d'en réduire le poids tout en assurant une raideur suffisante. Le deuxième concept (EP2292481) présente une poignée mobile qui permet de bloquer autant les petites roues de plateformes abaissées (poignée en position basse) que les grandes roues des autres semi-remorques (poignée en position haute).

Quelques observations méritent d'être mentionnées par rapport à ces différents concepts:

- Il y a un souci de gérer la problématique de masse pour la manipulation et l'installation. Ainsi, différents concepts visent à diminuer le poids, sachant qu'une cale peut avoir une masse qui varie entre cinq livres dans le domaine du transport par camion jusqu'à plusieurs dizaines de livres dans d'autres domaines (ex. domaine minier). Alternativement, l'utilisation de manches avec roues constitue une solution intéressante à considérer (ex. US D609158);
- On peut aussi observer que plusieurs concepts ont une courbure similaire unique sur leur face postérieure (ex. US D409554). Cette courbure provient probablement des directives de la norme SAE J348. Nous verrons plus loin que ce concept ne devrait pas être retenu;
- Plusieurs systèmes de retenue au sol ou au quai sont suggérés dans les banques de données, un seul ayant été illustré ici (ex. US 7264092);
- Il est important de noter que le profil de l'extrémité supérieure des différentes cales varie sensiblement d'un concept à l'autre (ex. US D316243 vs US 7040461);
- Quelques concepts suggèrent d'utiliser une face concave selon deux axes perpendiculaires pour être en contact avec le pneu. Une double concavité apparaît intéressante *a priori* pour stabiliser la cale lorsque le pneu la compresse (ex. CA2484163); et
- Finalement, un des concepts est muni d'un système antivol, car le vol de cale semble être une problématique connue dans le domaine (cf. US 7264092).

Plusieurs concepts de système de retenue de cale au sol existent mais n'ont pas été présentés ici car aucun n'apparaît intéressant considérant les encombrements particuliers des quais et le climat du Québec, avec l'accumulation de neige et de glace l'hiver. La capacité de retenue des cales au sol demeure ainsi un problème majeur, ce qui limite les capacités des cales de roues.

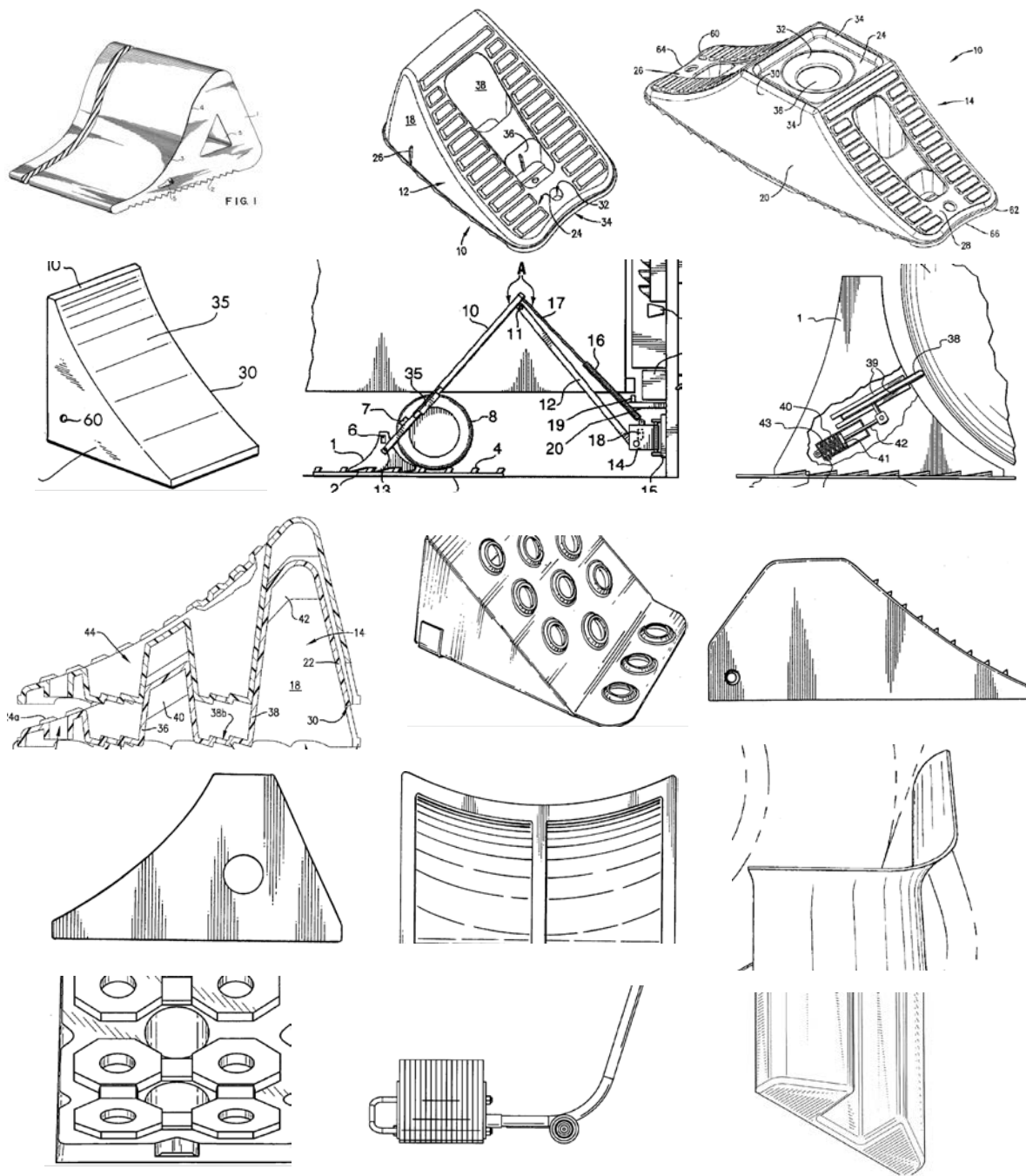


Figure 8 Illustrations de certains concepts provenant des banques de brevets canadiennes et américaines.

De gauche à droite, rangée 1: CA1001569, CA2484163, CA2484561; rangée 2: US4917219, US7264092, US7264092; rangée 3: US7040461, USD307575, USD316243; rangée 4: USD409554, vue supérieure USD409554, USD492928; rangée 5: USD577651, USD609158, USD633850.

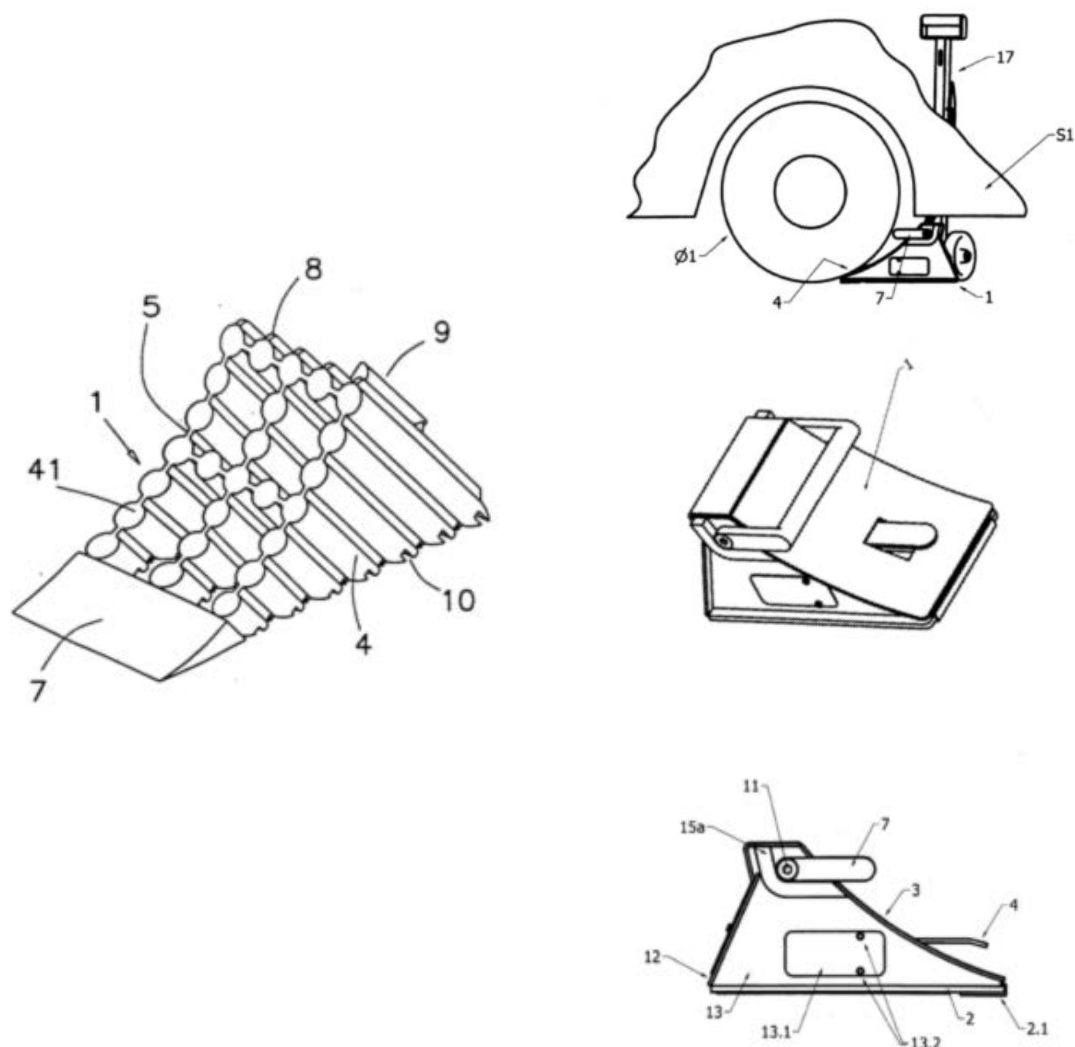


Figure 9 Illustrations de certains concepts provenant de la banque de données WIPO : EP1300305B1 (à gauche) et EP2292481 selon trois vues (à droite).

3.5 Sommaire du recensement des écrits

Le recensement des écrits a montré qu'il y a peu d'études spécifiques portant sur la conception et la définition de critères de conception de cale de roue dans la documentation scientifique. Un rapport de la défense américaine a été analysé en détail. Cette analyse a principalement permis de mettre en perspective les limites physiques d'une cale de roue aéronautique au regard du frottement statique au sol et de bien montrer qu'une cale de roue sans utilisation de système de retenue au sol ne peut pas fournir une force de retenue supérieure à la capacité de frottement statique de l'interface cale-sol.

Les résultats d'un rapport technique de l'IRSST visant à évaluer la performance de cales de roue existantes pour trois problématiques communes (départ inopiné du camion, freinage des chariots dans la semi-remorque, entrée et sortie du chariot) ont ensuite été présentés. Ce rapport a mis en évidence six modes de défaillances qui influencent directement les critères de conception. Finalement, une recherche a indiqué que les brevets existants s'attardent principalement à des caractéristiques spécifiques telles l'entreposage, la manutention, l'ajout d'un système de retenue au sol plutôt qu'au profil géométrique souhaitable d'une cale. Pourtant, le profil géométrique joue un rôle clé dans la performance de la cale puisqu'il influence directement sa capacité de retenue, phénomène étudié en détail à la section 4. Les écrits fournissent des informations utiles pour définir des fonctions primaires et secondaires de cale de roue, mais ils ne fournissent pas de critères de conception spécifiques.

4. MÉCANIQUE DU BLOCAGE D'UNE ROUE PAR UNE CALE

L'évaluation de la performance de blocage des cales de roues constitue un défi scientifique important. Les tests expérimentaux demandent une organisation et des mesures complexes tandis que l'évaluation à partir de modèles théoriques est, *a priori*, encore plus laborieuse. En effet, le phénomène de blocage par cales de roues est le résultat d'une interaction complexe entre un pneu en caoutchouc, une cale en métal, en bois ou en matériau élastomère et un sol soumis à de grandes charges et de grandes déformations. Les trois sous-systèmes sont constitués de matériaux qui incluent des phénomènes hyper élastiques, non-linéaires et viscoélastiques. Bien que certains chercheurs tentent de développer des modèles représentatifs de ces phénomènes grâce à la disponibilité de logiciels de simulations de plus en plus performants, la modélisation de l'interaction des trois sous-systèmes constitue à elle seule un défi de taille.

Devant une telle complexité, il est essentiel, en premier lieu, d'analyser le phénomène à partir des notions de base de la mécanique et, ensuite, de s'attarder aux détails d'une modélisation plus complexe. Ainsi, dans l'analyse du blocage de roue, un certain nombre de phénomènes peuvent être mis en lumière et permettent déjà de définir une majeure partie des critères de conception d'une cale de roue. Ces différents phénomènes sont expliqués dans cette section.

4.1 Phénomène de résistance au glissement de la cale au sol

Fondamentalement, une cale de roue fonctionne en tirant profit de sa résistance au glissement sur le sol. Sans résistance, la cale ne peut fonctionner. Cette résistance peut provenir de systèmes mécaniques qui fixent la cale au sol ou au quai derrière le camion ou la semi-remorque. Bien que de tels systèmes existent commercialement, ils sont beaucoup plus chers qu'une simple cale mobile et présentent des problématiques de fonctionnement importantes dans un environnement où il y a présence de neige et/ou de glace. Certains concepts ajoutent des aspérités sur la face inférieure de la cale afin qu'elles s'engrènent dans des grillages ou des plaques avec rainures, fixées au sol. Bien que de tels systèmes améliorent grandement la résistance au glissement de la cale au sol, la présence de neige, de glace ou de sable apporte des difficultés techniques non négligeables. De plus, il arrive parfois que le camion ou la semi-remorque ne soient pas stationnés perpendiculairement au quai (en raison des contraintes d'espace, par exemple) de sorte que tout système mécanique de retenue devrait être conçu pour fonctionner malgré un tel désalignement. Les différents systèmes que nous avons répertoriés durant notre étude ne semblaient pas tenir compte de cette problématique. Il n'est donc pas surprenant qu'en pratique la cale mobile (c.-à-d. non rattachée à un système mécanique) représente toujours une avenue intéressante.

Dans ce contexte, il est important de développer une interface cale-sol qui ait la meilleure résistance au glissement possible. La revue d'antériorité a démontré que le choix approprié de matériaux, l'ajout d'aspérités ou d'arêtes agressives et la conception même de la cale constituent différentes avenues qui ont été explorées. Cependant, un concept peut être performant pour un certain type de sol et se révéler inefficace pour un autre type. Afin de mieux comprendre cette problématique, un modèle simplifié de glissement de la cale au sol est illustré à la Figure 10.

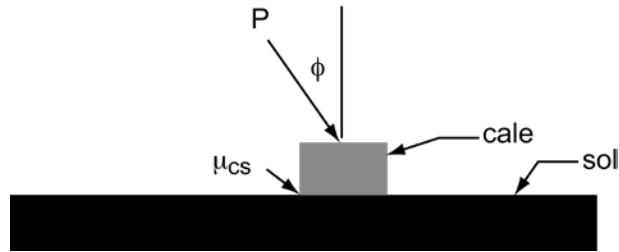


Figure 10 Modèle simplifié de cale en glissement pur.

Les notions de base de la statique impliquent que, pour éviter un glissement dans un tel système idéal, avec une interface présentant un coefficient de frottement μ_{cs} entre la cale et le sol, la force P appliquée sur la cale doit l'être avec un angle ϕ maximal par rapport à la verticale de sorte que:

$$\tan \phi = \mu_{cs} \quad (13)$$

A priori, il peut sembler difficile d'imposer l'orientation de la force d'interaction du pneu avec la cale. Cependant, par un design judicieux de la cale, il est possible de contrôler l'orientation de la force d'interaction pneu-cale, tel qu'illustré à la Figure 5. En effet, il est important de remarquer que la cale ne devient fonctionnelle que lorsque la roue roule sur la face postérieure de celle-ci. Si les freins sont appliqués sur la roue et qu'elle ne peut que glisser au sol, la performance de la cale pourrait être significativement diminuée. On peut donc supposer que la roue est libre de rotation dans l'analyse qui suit, ce qui est valide pour les cas de départ inopiné du camion ou de pertes de freinage aux roues.

Ainsi, aussitôt que le pneu roule sur la face postérieure de la cale, le pneu décolle du sol et les seules forces qui sont alors appliquées sur la roue sont celles provenant de l'essieu et du contact entre la cale et le pneu. En considérant que la cale bloque le mouvement de la roue sans glisser au sol, la roue est en équilibre quasi-statique à ce point et la force de contact N entre la cale et le pneu doit nécessairement passer par l'axe de la roue (Figure 11). Autrement, la roue commencera à tourner autour de l'essieu jusqu'à ce que le système atteigne un point d'équilibre, lequel constitue un minimum local dans le champ potentiel du système. Par conséquent, si on connaît le point de contact entre la cale et le pneu, on peut déterminer l'orientation de la force d'interaction N et ainsi connaître son orientation par rapport au sol. Tel que discuté plus haut, si on veut tirer profit de la résistance maximale de l'interface cale-sol, cette orientation doit respecter l'équation (13).

À titre d'exemple, prenons une cale aéronautique standard de cinq pouces pour expliquer ce phénomène, avec un pneu de 56 pouces de diamètre pour un avion B-52 (Figure 11). Lors du premier contact du pneu avec la cale, si on suppose que le pneu conserve sa circularité et son diamètre, on peut facilement démontrer par calcul géométrique que le contact se réalisera avec le coin supérieur du chanfrein orienté à 45° par rapport au sol. Si on se réfère à la Figure 11, la ligne directrice de la force de contact résultante N avec la cale se situe alors selon une droite qui passe par l'essieu et le point de contact, à un angle ϕ de la verticale (35° dans ce cas). Si le coefficient de frottement au sol est supérieur à $\tan(\phi)$, le pneu ne sera pas en mesure de faire

glisser la cale sur le sol. Par contre, si le coefficient de frottement au sol est inférieur à $\tan(\phi)$, le pneu fera glisser la cale parce que la composante horizontale de la force N sera trop grande.

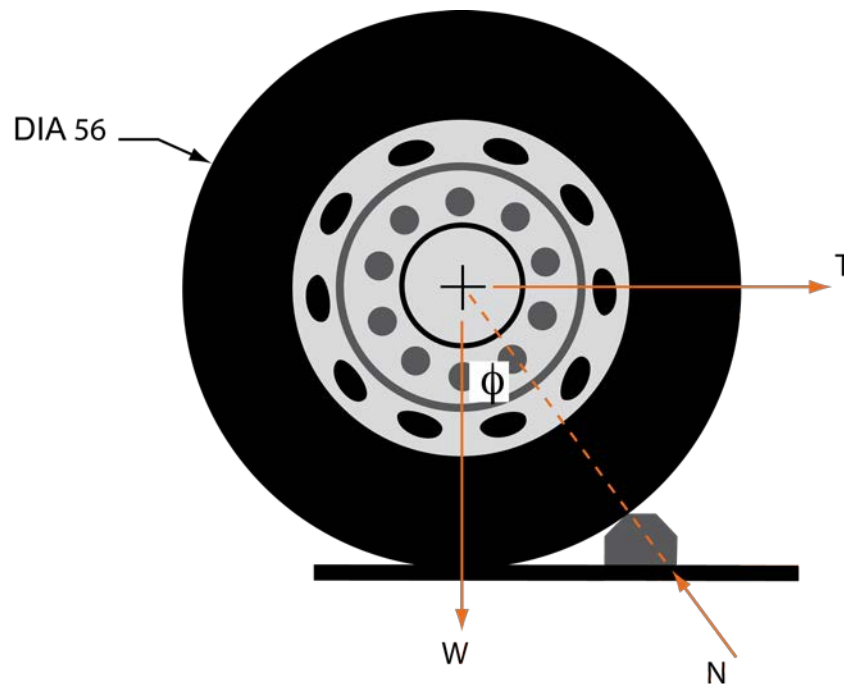


Figure 11 Interaction d'un pneu de diamètre 56 pouces avec une cale aéronautique de cinq pouces de hauteur.

Plusieurs cales commercialement disponibles démontrent une courbure sur leur face postérieure compatible avec celle du pneu, tel que suggéré par la norme SAE J348 qui favorise un maximum de contact du pneu avec la cale. À notre avis, cette norme induit en erreur parce qu'un tel design fait en sorte de ne pas bien contrôler le point de contact initial du pneu avec la cale. De plus, ce design induit probablement un premier contact du pneu avec la partie supérieure de la cale, un point de contact qui fait en sorte de faire augmenter l'angle ϕ et de faire glisser la cale devant le pneu. Ce mode de défaillance, identifié au Tableau 3 (cas B), se présente entre autres lorsqu'une cale, pourtant performante sur l'asphalte, ne l'est plus sur une surface glacée puisque le coefficient de frottement de la surface est grandement diminué. Il est important de noter que le point de contact du pneu avec la cale demeure le même, que la surface soit glacée ou non.

En résumé, le point de contact initial entre la cale et le pneu aura un impact important sur le glissement ou non de la cale antérieurement; la localisation de ce point étant dépendante du rayon du pneu et du coefficient de frottement au sol. Comme ces deux variables peuvent facilement changer selon les types de roues et de sol, il convient de concevoir une cale qui pourra contrôler le mieux possible le point de contact initial dans la plupart des situations rencontrées.

Supposons un cas extrême, soit un sol glacé ayant un coefficient de frottement de 0,15 à l'interface sol/cale. Dans ce cas, l'angle ϕ , au contact initial, devra être de $8,5^\circ$. Ceci explique l'importance d'avoir un angle très aigu à l'extrémité postérieure de la cale. En fait, la cale spéciale développée par le U.S. Air Force, illustrée à la Figure 5, contrôle le premier point de contact en assurant une marche très peu élevée à l'extrémité postérieure. Cette marche est de un pouce pour la cale de la Figure 5. Dans le cas des pneus de camions 11R22.5 (pneus communément utilisés pour les semi-remorques), il serait raisonnable d'avoir une marche qui assurerait un angle de contact initial ϕ égal à $11,3^\circ$, équivalent à un coefficient de frottement au sol de 0,2, tel qu'illustré à la Figure 12. Ce calcul nous amène à une marche de 0,38 pouce de haut, ou 9,6 mm. Évidemment, en fonction de la présence de glace, de neige ou de sable, cette hauteur peut ne pas être parfaitement contrôlée.

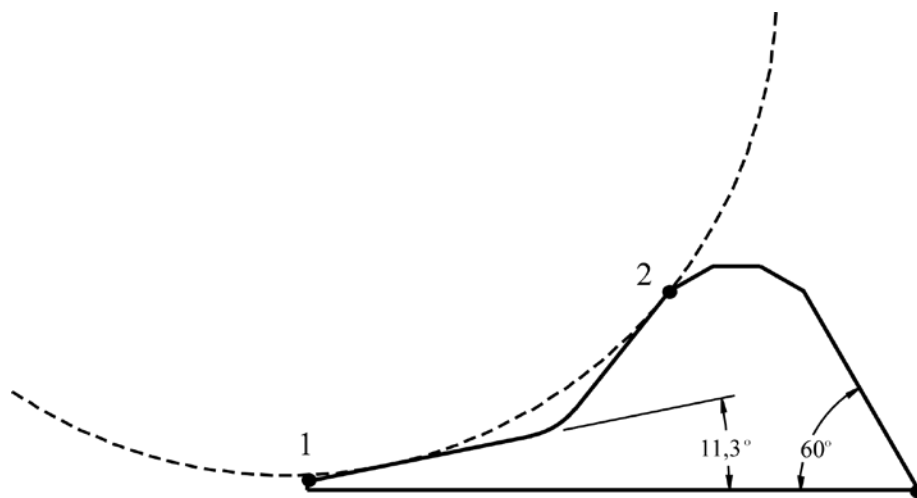


Figure 12 Cale de roue suggérée pour pneu 11R22.5.

4.2 Distance maximale de glissement ou de déplacement de la semi-remorque

Le concept de cale proposé à la Figure 12 nous amène à considérer le déplacement antérieur requis avant que le camion ou la semi-remorque ne se stabilisent sur la cale s'ils se déplacent vers l'avant d'une façon passive. Il est opportun de se demander si cette distance est acceptable pour éviter la chute de la lèvre qui relie le quai au camion ou à la semi-remorque. Selon différentes sources dans le milieu, la lèvre chevauche le plancher du camion ou de la semi-remorque sur une distance de quatre à six pouces.

Cette distance peut, en fait, se calculer comme suit. Les lèvres ont généralement une longueur minimale de 16 pouces quoiqu'elle pourrait être plus élevée dans certains cas (source : communication personnelle avec un fournisseur de quai élévateur pour quai de chargement pour camions). L'axe de la lèvre est généralement aligné avec la face du mur de béton du quai. Des blocs amortisseurs en caoutchouc d'environ quatre pouces sont habituellement accolés au quai,

diminuant ainsi la longueur potentielle de chevauchement de la lèvre avec la plateforme à 12 pouces. De même, certains camions ou semi-remorques possèdent des blocs amortisseurs en caoutchouc de trois à quatre pouces sur leur face postérieure. Ces blocs font que le chevauchement possible diminue maintenant à huit pouces. Certains camionneurs, lorsqu'ils touchent au quai, avancent légèrement, typiquement de un à deux pouces, laissant ainsi un chevauchement potentiel de six pouces. Finalement, le camion ou la semi-remorque ne sont pas toujours orientés perpendiculaire au quai et la plateforme élévatrice du quai peut avoir une élévation importante, en particulier s'il y a amoncellement de neige. Ceci fait en sorte que le chevauchement peut être potentiellement réduit à quatre pouces. Ainsi, à des fins conservatrices, on peut supposer qu'un mouvement antérieur maximal du camion d'une distance de deux pouces serait l'objectif idéal (quatre pouces étant un maximum) avant que la cale ne bloque le camion. Toutefois, il est à noter que si la cale entre en action, il est fort probable que le camion ou la semi-remorque reviennent à leur position initiale par la suite, de sorte que le chevauchement perdu sera repris par la lèvre.

4.3 Phénomène d'écrasement de la cale

Une fois que la roue est montée sur la cale, la charge sur la cale est à peu près équivalente à celle qui était auparavant sur le pneu. Étant donné qu'un total de 18 000 kg peut se retrouver sur la suspension arrière d'une semi-remorque selon les normes québécoises (MTQ, 2005), pour être très conservateur, une cale devrait être en mesure de soutenir une force de compression de 18 000 kg. La norme SAE J348 stipule qu'une cale doit être en mesure de soutenir une force de compression de 14 000 kg, ce qui nous apparaît acceptable comme performance. Par contre, la norme ne fournit aucune indication précise concernant la raideur minimale de la cale. En effet, certaines cales en caoutchouc peuvent soutenir une charge de 14 000 kg sans se dégrader, mais elles se déforment d'une façon démesurée, faisant en sorte d'éliminer leur action de blocage. La raideur recherchée devrait être telle que la déformation de la cale est suffisamment faible pour ne pas changer significativement son profil géométrique et, ainsi, la trajectoire de l'essieu lorsque le pneu monte sur la cale.

Selon Fancher et coll. (1986), la raideur radiale d'un pneu est de l'ordre de 1×10^6 N/m tandis que celle d'une suspension serait de l'ordre de $1,2 \times 10^6$ N/m. Si on prend 1×10^6 N/m comme référence, on pourrait exiger qu'une cale ait une raideur 10 fois plus grande, c.-à-d. 10×10^6 N/m, menant ainsi à une déformation de 1,4 cm pour une charge de 14 000 kg. Cette déformation nous apparaît trop élevée. Cependant, on peut supposer que la charge réelle sur une cale ne devrait en réalité pas dépasser 5 000 kg, de sorte que la déformation résultante serait de 5 mm. Cette déformation nous apparaît être un maximum acceptable et fait en sorte qu'une raideur minimale de 10×10^6 N/m devrait être visée pour une cale.

4.4 Phénomène de pivotement de la cale

Lorsque le pneu monte sur certains modèles de cales, il arrive que ces dernières pivotent antérieurement autour de leur arête antérieure inférieure. Ce mode de défaillance est illustré au Tableau 3 (cas C). Il provient du fait que la force résultante de contact N entre la cale et le pneu est orientée de sorte que sa ligne d'action passe antérieurement à l'arête antérieure inférieure. Ce mode de défaillance peut donc être évité en s'assurant, par conception du profil de la cale, que la

direction de la force résultante N demeure toujours dans l'aire de sustentation de la cale. Lorsque la roue monte sur la cale, la direction de la force N ne doit pas dépasser antérieurement l'arête antérieure inférieure de la cale en tout temps.

À titre d'exemple, la cale aéronautique de cinq pouces est conçue pour éviter un tel phénomène. Si on suppose que les pneus sont infiniment rigides (diamètre et circularité conservés), un pneu de 56 pouces de diamètre résultera en un contact avec le coin supérieur du chanfrein, et une force résultante de contact à 35° de la verticale avec une ligne directrice qui passe postérieurement à l'arête antérieure inférieure (Figure 13). Pour un pneu de 34 pouces à 56 pouces de diamètre, le contact se fera toujours au coin supérieur du chanfrein, mais la ligne directrice aura respectivement une orientation entre 45 et 35° de la verticale. Pour un diamètre de 34 pouces, la géométrie de la cale est telle que la ligne directrice sera exactement alignée avec l'arête antérieure inférieure, à un angle de 45° par rapport à l'horizontale. Pour des diamètres de pneus entre 20 et 34 pouces, le contact se fera avec la face du chanfrein orienté à 45° et la ligne directrice de la force résultante sera toujours à 45° de l'horizontale, et elle passera postérieurement à l'arête antérieure inférieure. Pour des pneus d'un diamètre inférieur à 20 pouces, l'orientation de la ligne directrice de la force de contact résultante variera entre 45 degrés et 90° , une situation qui est à éviter étant donné les coefficients de frottement communément retrouvés sur le terrain. Par conséquent, grâce au contrôle géométrique du profil de la cale, il est impossible, statiquement, que la normale N ait une direction qui dépasse antérieurement l'arête antérieure inférieure, si la cale est utilisée avec des pneus de 20 pouces de diamètre minimum.

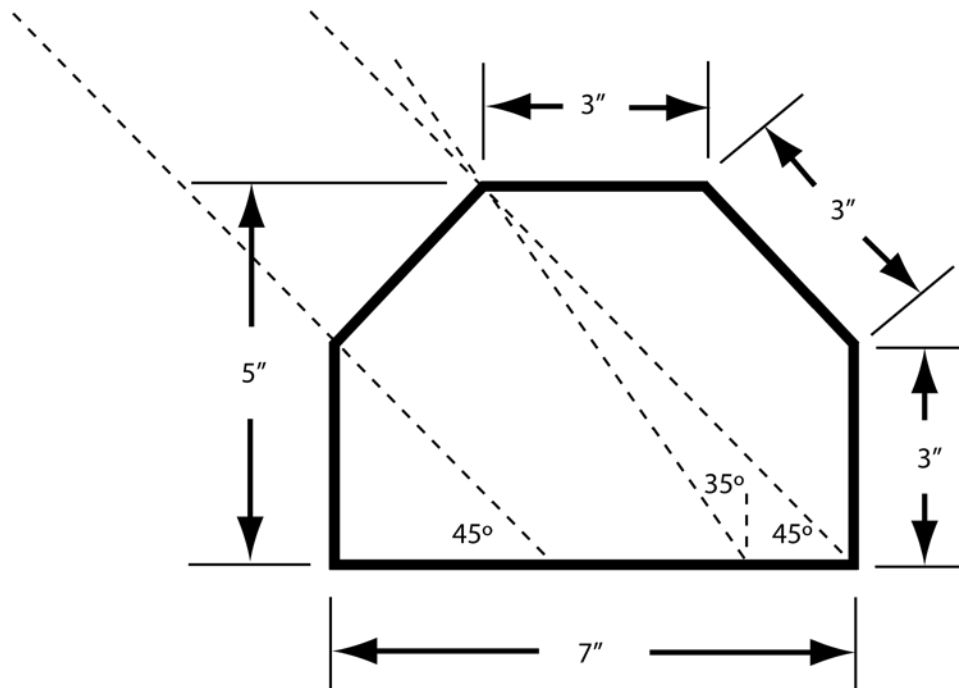


Figure 13 Géométrie d'une cale aéronautique permettant d'éviter que la ligne de direction de la force de contact N soit postérieure à l'arête antérieure inférieure, en tout temps.

Une mauvaise gestion du profil de la cale explique probablement pourquoi plusieurs types de cales commerciales pivotent antérieurement lors du passage de la roue (Gauthier *et al.* 2006). De plus, en présence d'un terrain non ferme, le coefficient de frottement effectif au sol peut varier et l'orientation relative de la cale peut changer par rapport au sol. Le profil doit donc tenir compte de ces variations. À notre avis, la gestion du profil et de l'orientation de la cale joue un rôle majeur dans la performance de celle-ci. Ainsi, la base de la cale devrait être une paroi pleine pour limiter un enfoncement indésirable qui pourrait entraîner des modifications à l'orientation de la cale. Cette paroi doit être conçue avec minutie pour éviter des ruptures de la cale et son expulsion, selon les façons dont les charges sont transférées au sol.

4.5 Passage de la roue par-dessus la cale

La problématique du passage d'une roue par-dessus la cale est principalement d'intérêt dans le cas d'un départ inopiné du camion. Cette situation représente un danger pour le cariste qui conduit son chariot élévateur lorsqu'un conducteur décide de quitter le quai avec le camion avant que le chariot élévateur n'ait terminé son travail de chargement. À ce moment-là, les portes du camion ou de la semi-remorque ne sont pas encore fermées. Le conducteur a l'habitude de s'éloigner du quai non pas pour quitter définitivement, mais pour avancer sur une distance variant de quelques pieds à environ une longueur de camion (*c.-à-d.* plus de 53 pieds s'il y a présence de semi-remorques adjacentes sur l'un ou l'autre côté) afin de pouvoir fermer les portes de la semi-remorque. Un tel déplacement fait en sorte que le conducteur démarre le plus souvent en basse vitesse, soit en quatrième ou cinquième vitesse, lorsqu'il est sur le plat (source : communication personnelle avec Robert Poulin, répartiteur d'expérience pour une flotte de camions au Québec). Dans une situation où il y a une pente montante, on peut penser que le conducteur pourrait démarrer en plus basse vitesse, bien que celui-ci démarre rarement en première vitesse. Ainsi, la vitesse d'avance du camion est habituellement faible lors d'un départ inopiné. Si une cale n'a pas été retirée lors d'un tel départ, il y aura une résistance au déplacement du camion, faisant en sorte de caler potentiellement le moteur. Le cas échéant, si la force de contact avec la cale est orientée plutôt vers la verticale (ex. utilisation d'un bois de charpente 2x4 comme cale), la cale pourrait ne pas glisser sur le sol et la roue pourrait passer par-dessus. Par contre, si la composante horizontale de la force de contact entre le pneu et la cale est trop élevée, celle-ci glissera, à moins qu'il y ait des moyens de retenue mécaniques.

Sachant qu'un coefficient de frottement cale-sol ($\mu_{cs}=1$) représente le plus souvent une situation maximale de frottement sur le terrain, l'équation (10) nous indique que la force de résistance maximale que toute cale serait capable de produire est équivalente à la charge sur l'essieu. Ainsi, si une seule cale est utilisée et que la charge sur la roue est d'environ 5 000 kg, la résistance maximale théorique serait de 5 000 kg (ou 11 000 lb). Si deux cales sont utilisées, une résistance théorique de 10 000 kg (ou 22 000 lb) serait possible. De telles résistances seraient suffisantes pour, au minimum, que le conducteur réalise qu'il y a une cale toujours en place. Par contre, sachant qu'un tracteur et sa semi-remorque peuvent peser autant que 45 000 kg (9 000 kg * 5 essieux), selon les normes routières québécoises (MTQ, 2005), et qu'un camion peut tirer sa charge sur des dénivellations d'au moins 10 % ou 5,7°, un tracteur est donc en mesure de tirer un minimum de 4 500 kg à l'horizontale (ou environ 10 000 lb). Cette capacité serait plutôt de l'ordre de 15 000 kg (33 000 lb) selon Gauthier *et al.* (2006). Par conséquent, il nous apparaît

irréaliste de croire qu'une cale mobile de conception classique, sans retenue mécanique, puisse empêcher un tracteur d'avancer.

La cale peut tout de même créer une résistance non négligeable qui va soit alerter le conducteur, soit faire caler le moteur. En effet, elle va produire une résistance équivalente à une pente de l'ordre de 10 %, tel que calculé à la section 3.2.2. Une telle pente suffit normalement à obliger le conducteur à sélectionner un rapport de vitesse plus faible au démarrage. La présence d'une cale peut donc contribuer à alerter un conducteur averti afin qu'il ne quitte pas le quai.

À notre avis, il est préférable de concevoir une cale qui empêchera la roue de passer par-dessus celle-ci tout en tirant profit du maximum de résistance au glissement de celle-ci sur le sol. Ceci peut être réalisé en s'assurant que la cale glisse dans les conditions de terrain présentes, mais seulement lorsqu'elle aura atteint un maximum de résistance au glissement donné par l'équation (10). Cette approche de conception permet de contourner la problématique de passage de la roue sur la cale et les dangers qui pourraient en résulter. De plus, si la roue passe par-dessus celle-ci, la résistance à l'avancement va aussitôt disparaître tandis que si la cale glisse antérieurement, la résistance va demeurer et pourra éventuellement augmenter les probabilités que le conducteur constate la présence d'une anomalie.

4.6 Phénomène de labourage de la cale

Les charges élevées sur la cale font en sorte que celle-ci peut effectuer un labourage non négligeable, par l'arête antérieure inférieure, sur des terrains plus mous (terre, graviers, neige, etc.) (Tableau 3, cas D). Le labourage peut augmenter la résistance au glissement d'une cale et apparaît être, *a priori*, bénéfique. Cependant, il implique probablement une perte de hauteur de la cale et un changement de profil de celle-ci, relativement à l'horizontale, qui peuvent diminuer significativement sa performance. De plus, le labourage peut augmenter le coefficient de frottement effectif avec le sol de sorte qu'un pivotement antérieur de la cale peut survenir plus facilement. Par conséquent, il apparaît essentiel d'ajouter des moyens de limitation du labourage afin d'en contrôler la profondeur et d'en tirer profit au besoin. La cale que nous proposons dans ce présent rapport pourrait gérer cette situation en incorporant des aspérités de hauteur contrôlée sur sa face inférieure et en ajoutant des ailettes sur son pourtour.

4.7 Phénomène d'expulsion de la cale

Si la cale ne glisse pas au sol et que la roue réussit à monter sur sa partie supérieure, une quantité d'énergie appréciable sera emmagasinée dans la suspension et dans le pneu comprimé. Si, pour quelque raison que ce soit, la cale change légèrement d'orientation, celle-ci pourrait tomber à la renverse ou être expulsée latéralement ou antéro-postérieurement par l'action de la force normale de contact avec le pneu (tableau 3, cas F). L'énergie stockée serait alors restituée rapidement à la cale et celle-ci pourrait devenir un projectile pouvant occasionner des bris ou des blessures. Afin d'éviter une telle situation, il est essentiel de concevoir une cale dont la force normale N de contact avec le pneu passe toujours par la base de sustentation de la cale, pour des variations d'orientation de l'ordre d'une vingtaine de degrés environ. En d'autres mots, il est essentiel de concevoir une cale de sorte qu'un travail positif est nécessaire pour faire varier l'orientation de la

cale par rapport à sa position de mise en charge initiale. Autrement, la cale pourrait devenir instable et être éjectée pendant que la roue tente de monter sur sa face postérieure.

Cette problématique d'expulsion doit être gérée selon les directions latérales et postéro-antérieures de la cale. Latéralement, la situation est plus facile à gérer, car le pneu ne peut pas pivoter selon un axe perpendiculaire à son axe de rotation, il ne peut que se déformer latéralement. Il suffit alors de concevoir une cale avec une largeur suffisante pour faire en sorte que l'énergie de déformation emmagasinée dans le pneu et la suspension augmente avec une rotation latérale de la cale par rapport au sol, ou à une déformation latérale du pneu. Le domaine de l'aéronautique gère cette situation en ayant recours à des cales d'une largeur suffisamment importante, de l'ordre de quelques pieds.

La stabilisation de la cale en direction postéro-antérieure est plus difficile à gérer parce que la roue ne peut contribuer à la stabilisation du système, car elle tourne librement par rapport à son axe de rotation. Afin de bien comprendre comment assurer la stabilisation du système dans cette situation, la Figure 14 illustre une roue d'une semi-remorque, rattachée à un tracteur, qui comprime une cale triangulaire en équilibre statique sur son arête antérieure. Cet équilibre est stable asymptotiquement si, lorsque la roue tourne dans un sens ou dans l'autre, l'énergie potentielle du système augmente *c.-à-d.* que ses lignes de champ font en sorte que l'énergie potentielle de déformation emmagasinée dans le système (pneu, cale, suspension) augmente avec la rotation du pneu. L'équilibre sera marginalement stable si les lignes de champ sont telles que l'énergie demeure constante avec la rotation du pneu, et instable si l'énergie potentielle diminue.

Le profil géométrique de la face postérieure de la cale affecte directement la courbure du champ potentiel. Par exemple, le fait d'avoir une cale avec une longue pente très aigüe près du pneu fait en sorte d'assurer la stabilité pour la rotation du pneu dans une des deux directions. L'autre direction est en général non problématique, car la cale se retrouve propulsée au sol. Il existe des cales qui n'ont pas de structure à pente très aigüe et qui génèrent un phénomène de pivotement sur l'arête antérieure. Dans ce cas, au cours de la mise en charge de la cale par la roue qui monte sur celle-ci, la cale se retrouve soudainement propulsée antérieurement, notamment s'il y a glissement antérieur de la cale au sol. Si la roue passe par-dessus la cale, il peut y avoir expulsion postérieure de la cale lors de la libération de l'énergie emmagasinée dans le pneu et la suspension. La forme des chanfreins de la partie supérieure peut jouer un rôle dans la stabilité de la cale. Une étude plus approfondie de modélisation de la stabilité des cales est essentielle afin d'éviter un tel mode de défaillance car malgré la présence de chanfreins, cette problématique d'expulsion a été expérimentée par Buchser (1984) avec le "engine run chuck". Afin d'éviter une expulsion dangereuse, il serait judicieux d'ajouter des câbles ou des chaînes qui limiteraient le mouvement de la cale en cas d'expulsion et qui pourraient même absorber l'énergie transmise à la cale.

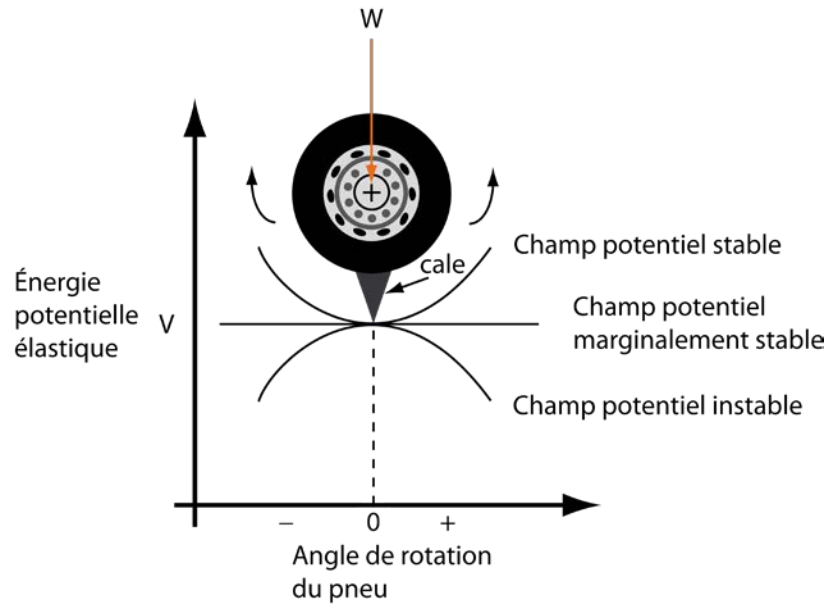


Figure 14 Diverses formes du champ d'énergie potentielle élastique créé par une cale en compression et en support sur son arête antérieure inférieure, en fonction de la rotation du pneu.

4.8 Principe d'énergie potentielle élastique dans l'analyse d'une cale

À la section 3.2.3, l'analyse de la performance de la cale par approche énergétique a permis d'introduire le principe de champ d'énergie potentielle élastique. Cette même approche a été utilisée dans la section précédente pour comprendre le phénomène d'instabilité des cales. En fait, la fonction générale d'une cale est de créer un tel champ potentiel. La géométrie et la raideur d'une cale sont deux variables qui font en sorte de contrôler la trajectoire suivie par le système au travers de ce champ potentiel lorsque la roue interagit avec la cale. La prédiction par modélisation de ce champ potentiel et la trajectoire suivie par le système dans ce champ est un défi de taille, mais toutefois réalisable. À notre avis, il est possible de définir la stabilité d'une cale en respectant des critères spécifiques de profil et de raideur qui seront à déterminer par l'intermédiaire de modélisations théorique et expérimentales plus avancées.

5. CONCEPTION D'UNE CALE DE ROUE

Les connaissances acquises jusqu'à maintenant nous permettent de décrire en détail le principe de conception d'une cale. La section suivante complètera le processus en déterminant si la cale répond aux différentes fonctions établies et aux notes et contraintes à la conception. La cale que nous proposons a un profil illustré à la Figure 15. Il a été choisi selon une logique simple qui assure une résistance maximale de la cale au glissement. La procédure de conception de la cale proposée suppose que le pneu ne se déforme pas. La procédure qui est décrite considère que les coefficients de frottement limites entre la cale et le sol sont $\mu_{\min} = 0,2$ et $\mu_{\max} = 1,25$. La cale proposée permet de toujours profiter de la capacité en frottement disponible au sol, pour un terrain ayant un coefficient de frottement qui varie entre $\mu_{\min}$ à $\mu_{\max}$, sans risque de pivotement, lequel mode de défaillance est non souhaitable pour la sécurité.

Hauteur du premier contact a

Le premier contact entre le pneu et la cale a lieu au point 1. Le coefficient de frottement minimum à considérer définit la hauteur a ainsi que la pente ϕ en fonction du rayon du pneu r_{pneu} . Le rayon à utiliser est le rayon effectif après chargement nommé « loaded radius » chez les fabricants de pneus. Le pneu utilisé pour l'exemple qui suit est le 11R22.5 XDA®5 de Michelin pour lequel le rayon effectif est de 19,5 po (49,5 cm) (Michelin, 2013). Afin d'éviter que la cale se fasse pousser par le pneu, la hauteur du premier contact entre le pneu et la cale doit respecter la condition $\tan \phi < \mu_{\min}$, soit $\phi < 11,3^\circ$ pour le cas considéré. Le cercle en ligne pointillée illustre le pneu lors de ce premier contact. Une hauteur a de 0,38 po est obtenue avec $r_{\text{pneu}}(1 - \cos \phi)$.

Inclinaison du premier segment de pente b

La pente du segment b est donnée par l'angle ϕ défini précédemment, soit $\phi \neq 11,3^\circ$. Cette pente assure, d'une part, que la cale ne glisse pas au sol pour une quelconque force de traction T (situation qui serait possible pour de plus grandes valeurs d'angle ϕ) et, d'autre part, que la cale élève suffisamment l'essieu (c.-à-d. 0,6 pouce tel que défini plus bas) pour que toute la charge verticale soit reprise par la cale. La roue étant libre de tourner sur elle-même, elle se déplacera sur la cale si la composante de la force de traction T selon la pente est plus grande que la composante selon la pente due à la force de gravité appliquée par l'essieu. Le déplacement de la roue s'arrête lorsqu'elle est en contact avec le segment d .

Longueur de la cale c

La longueur de la cale c doit être choisie de façon à éviter que la cale ne pivote par rapport au point O , l'arête antérieure inférieure. Le cas critique se produit lorsque la charge est entièrement reprise par le point 2 situé sur la deuxième pente (segment d). Or, l'inclinaison et la localisation de la deuxième pente ne sont pas encore connues et dépendent de la longueur d'engagement (L_E). Le roulement du pneu contre la première pente de la cale sur une distance horizontale équivalente à L_E permet d'assurer à la fois que la cale ne glisse pas au sol dans les conditions minimums de frottement ($\mu_{\min}$), et que la charge verticale de la roue soit reprise entièrement par la cale afin de maximiser la force de retenue possible. L'analyse de la cale de Buchser (1984) suggère qu'une élévation de l'essieu de 0,6 po (1,5 cm) est suffisante pour respecter cette condition. Ainsi, on peut faire rouler le rayon effectif du pneu contre la première pente de la cale

jusqu'à ce que l'essieu ait monté de 0,6 po tel qu'illustré par le cercle en ligne pleine. Dans le cas illustré, la longueur d'engagement est de trois pouces (7,6 cm), ce qui indique que pour bénéficier du coefficient de frottement maximal (lorsque le sol est dans sa meilleure condition de résistance au frottement), la roue devra se déplacer sur cette distance.

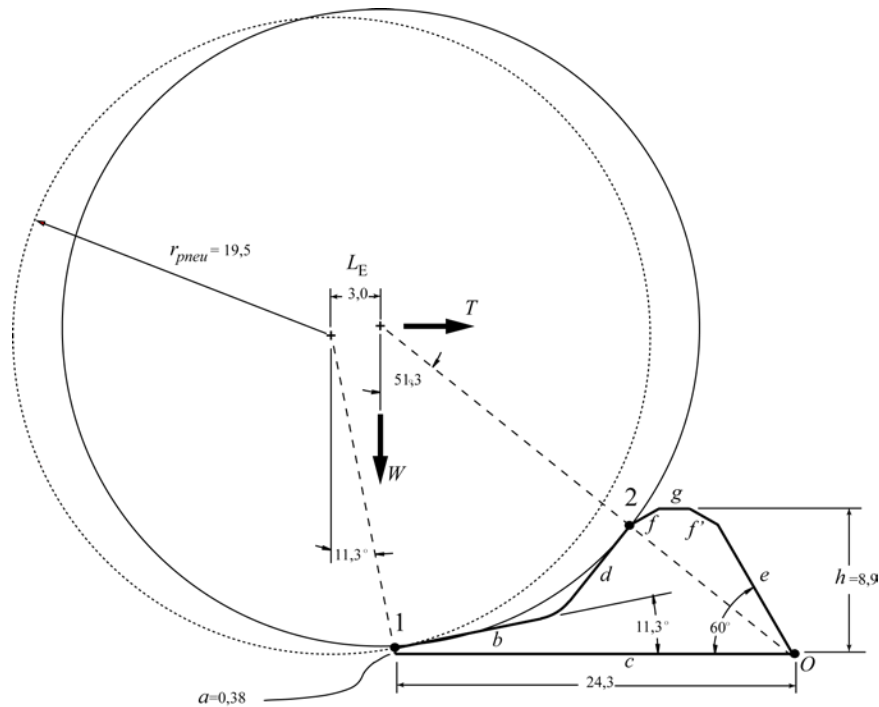


Figure 15 Caractéristiques de la cale proposée dans le cadre de la présente étude (unités en pouces et en degrés).

À partir de cette position, on peut définir le point de contact 2 sur la deuxième pente en considérant le coefficient de frottement maximal $\mu_{\max}$ qui définit l'angle maximum de la normale au contact en ce point. Avec $\tan \phi < \mu_{\max}$, on trouve $\phi < 51,3^\circ$. Pour une normale au contact ayant un angle supérieur, la cale glissera au sol même en présence de $\mu_{\max}$. Ainsi, en prolongeant cette normale au contact jusqu'au sol (droite en traits pointillés), on peut définir le point O de la cale, soit l'intersection de cette normale au contact avec le sol. Cela permet de définir la longueur minimale de cale, longueur qui assure que la résultante des forces appliquées par la roue sur la cale passe postérieurement au point O et que le pivotement de la cale dans le sens horaire ne peut pas se produire. Dans le cas présent, on obtient une valeur c de 24,3 pouces (61,7 cm).

Inclinaison du second segment de pente d

Le second segment de pente (d) est tracé par la droite tangente au pneu au deuxième point de contact. Il débute au point 2 et se termine par un arrondi qui rejoint le premier segment de pente afin de minimiser les concentrations de contraintes.

En condition normale d'utilisation, les autres dimensions (e , f , f' , g et h) sont arbitraires. Par contre, dans l'éventualité où la force de traction est suffisamment importante pour faire rouler le pneu par-dessus la cale (le coefficient de frottement effectif doit alors être supérieur à $\mu_{\max}$), on peut choisir ces dimensions afin que la cale ne puisse pivoter par rapport au point O et ainsi, être plus sécuritaire. En d'autres mots, on impose le mode de défaillance de la cale comme étant d'abord un glissement au sol et ensuite, si les conditions s'y prêtent, un passage du pneu par-dessus celle-ci en évitant, dans les deux cas, un pivotement antérieur de la cale et, si possible, son expulsion antérieure, postérieure ou latérale.

Inclinaison du segment e

Le segment e est incliné afin de contribuer à la stabilité de la cale dans l'éventualité où le pneu passerait par-dessus celle-ci. Un angle arbitraire de 60° est illustré; il permet aussi de limiter la grosseur de la cale tout en évitant d'avoir un sommet pointu qui pourrait endommager le pneu.

Hauteur de la cale h et segments f , f' et g

Dans l'éventualité où la force de traction serait très importante et que le coefficient de frottement au sol serait supérieur à $\mu_{\max}$, il serait possible que le contact entre le pneu et le point 1 n'existe plus et que le pneu effectue une rotation par rapport au point 2 pour continuer son parcours et rouler sur la cale. Dans ce cas, on veut éviter d'avoir des arêtes vives pour ne pas abîmer les pneus et éviter qu'il y ait pivotement de la cale par rapport au point O . En plaçant des chanfreins de 30° et en ajustant la hauteur, on peut obtenir des surfaces d'appui équivalentes pour les segments f , f' et g tout en évitant les arêtes vives et les possibilités de pivotement.

En résumé, une cale définie selon cette procédure présente trois avantages principaux. Le premier est de s'assurer de toujours aller chercher le maximum de résistance de l'interface cale-sol pour tout terrain ayant des coefficients de frottement situés dans une plage donnée, $\mu_{\min}$ à $\mu_{\max}$. Si le terrain présente un coefficient plus faible que la plage, la cale deviendra inopérante en glissant antérieurement. Si le coefficient est supérieur à la plage, il y aura passage du pneu par-dessus la cale. Le deuxième avantage est l'élimination de la possibilité d'un basculement antérieur de la cale, un autre mode de défaillance potentiel. Finalement, le troisième avantage est la possibilité de contrôler quand aura lieu le mode de défaillance A (Tableau 3), *c.-à-d.* le passage du pneu par-dessus de la cale. Nous préconisons qu'un design adéquat de la cale doit faire en sorte que ce mode soit évité, afin de toujours conserver la résistance au glissement.

6. CRITÈRES DE CONCEPTION D'UNE CALE DE ROUE

L'objectif de cette étude était de définir des critères de conception de cales de roue pour camions ou semi-remorques immobilisés aux quais de chargement. La revue d'antériorité a permis jusqu'ici de définir un certain nombre de critères listés au Tableau 1 qui s'apparentent plutôt à des contraintes ou notes à la conception. Ceux-ci ont été identifiés à l'aide des normes existantes et des exigences en vue d'une homologation des cales. Le Tableau 4 reprend ces critères en quantifiant, au mieux de notre connaissance, les valeurs minimales, maximales et cibles des niveaux d'atteinte pour chacun d'entre eux. Les niveaux de certains critères restent à définir et ceci se ferait normalement dans le cadre d'un projet de conception détaillée d'une cale qui tiendrait compte des domaines d'application. Comme chaque domaine peut nécessiter des niveaux d'atteinte différents, nous avons préféré, dans certains cas, ne pas statuer sur ceux-ci.

En général, il est rare que les normes spécifient une conception très détaillée d'un produit. Les normes se limitent plutôt à définir des critères de performance (incluant des protocoles de tests) afin de permettre à différents concepts d'être proposés. À l'occasion, certaines normes vont prescrire des détails de conception lorsque le produit a été éprouvé sur le terrain pendant une longue période, de sorte que les lacunes et les avantages d'un concept plutôt qu'un autre auront été identifiés. Dans cet esprit, notre étude a complété la liste des critères de conception de cale en établissant les fonctions primaires et secondaires d'une cale, en proposant un critère minimal et cible pour chaque fonction.

6.1 Fonctions primaires des cales de roue pour camions ou semi-remorques

La norme SAE J348 stipule que les cales de roues sont utilisées pour maintenir immobile un véhicule à l'arrêt, sur une pente pouvant aller jusqu'à 16,7°, ou 30 %, et l'utilisation d'une seule cale. Dans le domaine aéronautique, les cales sont utilisées sur un terrain généralement plat. Elles servent donc à contrer les forces du vent et, de plus, à résister aux efforts transmis par les moteurs lors de la période de réchauffement, jusqu'à leur poussée maximale. Dans tous les cas, les freins sont supposés être en action et les cales ne viennent qu'assurer une sécurité au cas où les freins ne seraient pas fonctionnels.

Le document NFPA 1901 de la National Fire Protection Association (NFPA 1901, 2003) stipule, quant à lui, une capacité de retenue sur une surface rigide ayant une pente pouvant aller jusqu'à 10 %, pour une seule cale. Il exige de plus l'utilisation de deux cales, permettant ainsi de se rapprocher des exigences de la Society of Automobile Engineers (SAE) de 30 % (2 cales * 10 % équivaut à une pente de 20 % environ pour une cale). Dans le cas de la NFPA, les camions de pompier étant au neutre lorsque la pompe est en opération, les cales servent à pallier une absence de freinage.

Tableau 4 Liste des contraintes à la conception pour cales de roue, version quantifiée.

Type de critère	Critère	Valeur minimale	Valeur maximale	Valeur cible
Environnement	Résistante aux rayons ultraviolets	à définir	à définir	à définir
	Fonctionnel dans une large gamme de températures	- 50°C (-60°F)	80°C (180°F)	-60°C (-75°F) à 80 °C (180°F)
	Fonctionnel malgré la présence de pluie, neige, glace, sable, sel	chaussée sèche	glace et sable	chaussée humide
	Ne flotte pas dans l'eau	-	-	ne flotte pas
	Résistante aux moisissures	à définir	à définir	à définir
Ergonomie	Couleur conforme aux normes du milieu	à définir	à définir	Jaune
	Masse*	-	25 kg	15 kg
	Arêtes arrondies	à définir	à définir	à définir
	Visibilité	à définir	à définir	à définir
	Présence d'un câble ou d'une chaîne rattachée à la cale	-	-	longueur normalisée
	Entreposable sur le tracteur ou à l'entrepôt	entrepôt	tracteur et entrepôt	tracteur et entrepôt
Sécurité	Ne produit pas d'étincelles lors du glissement au sol	-	-	Ex. Cales élastomère ou aluminium
	Inspection rapide	-	30 minutes	5 minutes
	Chaîne attachée au quai pour ne pas perdre les cales ou éviter les vols	à définir	à définir	à définir
Dimension				Voir section 5
Matériau-Mécanique	Résistante aux huiles, eau et produits du lieu d'utilisation, (essence, huile de transmission, huile à frein, etc.)	à définir	à définir	à définir
	Résistante aux chocs (ex. test de chute au sol)	chute de 1 mètre	chute de 4 mètres	chute de 3 mètres
	Résistante à l'écrasement**	10 000 kg	18 000 kg	14 000 kg

* La norme ISO 11228-1:2003 prescrit une masse maximale de 25 kg. Cependant, puisque la cale risque d'être manipulée à bout de bras à l'occasion, une valeur cible de 15 kg a été choisie. Cette valeur est identique aux exigences relatives aux cales pour aéronefs de l'armée américaine.

** Cette valeur a été déterminée en considérant que la charge maximale sur des roues tandem est de 18 000 kg selon le Guide des normes de charges et dimensions des véhicules du gouvernement du Québec (MTQ, 2005).

Pour le cas d'utilisation de cales pour camions ou semi-remorques, l'objectif général est de pouvoir immobiliser le véhicule au quai de chargement. Cet objectif peut se traduire par quatre fonctions primaires qui répondent à la problématique de la sécurité des chariots élévateurs aux quais de chargement (Tableau 5). La première fonction est d'immobiliser le véhicule contre l'action de la gravité en supposant que les freins du camion ou de la semi-remorque ne soient pas efficaces (F0-1). Cette fonction est essentielle, car il arrive que les freins ne soient pas bien ajustés. La deuxième fonction vise à garder le camion ou la semi-remorque immobile malgré le fait que le camion ou le tracteur, attaché à la semi-remorque, quitte le quai, bien que le chargement ne soit pas terminé (F0-2). On pourrait supposer qu'une telle situation pourrait être évitée par un bon système de communication, mais il arrive, par exemple, que le cariste indique au camionneur que le chargement est terminé alors qu'à la dernière minute, il décide de transférer une autre charge. Une telle situation peut aussi survenir si le conducteur choisit de quitter avec le mauvais camion ou semi-remorque. La troisième fonction primaire vise à garder immobile la semi-remorque malgré les freinages de chariots élévateurs sur la plateforme (F0-3). Finalement, la quatrième fonction consiste à minimiser le phénomène de rampement de la semi-remorque (F0-4). Tel que démontré à la section 3.3.2, à moins que la cale ne soit bien ancrée au sol, le rampement aura lieu. Alternativement, des dispositifs autres qu'une cale mobile doivent être envisagés pour cette situation.

Tableau 5 Fonctions primaires d'une cale de roue.

Fonction primaire	Descriptif	Critère minimal	Critère cible
F0-1	Immobiliser le véhicule contre l'action de la gravité	Voir exigences norme SAE J348: résistance à la traction de 10 433 kg pour une charge de 5 216 kg sur l'essieu. Équivaut à retenir un véhicule de 36 287 kg sur une pente de 16,7° ou 30 %	Idem
F0-2	Immobiliser le véhicule contre le départ inopiné du tracteur	Maintenir une résistance équivalente aux roues bloquées lors de l'avancement du tracteur	Immobiliser le véhicule
F0-3	Immobiliser la semi-remorque lors du freinage de chariots élévateurs sur la plateforme	Empêcher le glissement au sol de la semi-remorque	Empêcher le glissement au sol de la semi-remorque
F0-4	Immobiliser le véhicule lors du phénomène de rampement créé par le chariot élévateur roulant sur la plateforme	Empêcher le rampement de la semi-remorque	Empêcher le rampement de la semi-remorque

6.2 Fonctions secondaires des cales de roue pour camions ou semi-remorques

À partir des quatre fonctions primaires retenues, qui représentent des situations particulières à potentiel dangereux, des fonctions secondaires peuvent être identifiées. Définies au Tableau 6, ces fonctions sont associées principalement aux modes de défaillance identifiés auparavant au Tableau 3. Globalement, les fonctions F1 à F9 sont dépendantes d'au moins cinq paramètres de conception associés aux cales, soit :

1. Le système de retenue de la cale au sol: si un système de retenue de la cale au sol est envisagé, celui-ci doit tenir compte des conditions environnementales présentes et doit mitiger les risques possibles encourus (ex. voir fonction F8).
2. Le profil géométrique de la cale: celui-ci a un impact important sur la capacité de retenue par frottement au sol. Il doit être établi en fonction du diamètre du pneu et de la charge appliquée sur la roue. Il doit aussi tenir compte de la pente du terrain.
3. La raideur de la cale: Il a été estimé à la section 4.3 que la raideur devrait être de l'ordre de 10×10^6 N/m.
4. Le nombre de cales à utiliser: Une utilisation en paire aide à mieux répondre à la fonction F8, mais peut en même temps affecter la fonction F9.
5. La raideur du sol: Se basant sur la section 4.3, on peut supposer que le sol ait une raideur d'au moins deux fois celle de la cale, c.-à-d. 20×10^6 N/m.

Le Tableau 6 montre que plusieurs fonctions secondaires doivent être prises en compte dans la conception d'une cale. Le départ inopiné du camion ou du semi-remorque constitue la situation la plus exigeante du point de vue des fonctions secondaires et il constitue le point de départ de l'analyse. Dans le cas où toutes les fonctions secondaires ne peuvent être remplies en même temps, il y a lieu de déterminer à l'avance la fonction secondaire qui ne sera pas respectée. Ainsi, pour la cale que nous avons proposée, nous avons choisi de considérer que le mode de défaillance préférable dans une situation de départ inopiné, s'il doit y avoir défaillance, serait un glissement antérieur de la cale. Ce mode présente moins de problèmes de sécurité si on tient compte du fait que le conducteur peut contribuer à limiter le départ inopiné en détectant une résistance mécanique lors du départ. Le choix de ce mode prioritaire de défaillance procure un concept de cale qui permet aussi de tenir compte des deux autres fonctions primaires, c.-à-d. de contrer le mouvement du camion ou de la semi-remorque contre le freinage des chariots élévateurs et l'effet de la gravité. Dans ces deux cas, il demeure que le dispositif premier pour répondre à ces deux fonctions primaires est l'utilisation des freins, qui sont supposés être fonctionnels en condition normale.

Par contre, dans le cas où le freinage n'est pas à son maximum, la cale peut contribuer à immobiliser le camion ou la semi-remorque dans chacune de ces deux situations. Pour la fonction primaire F0-1, la gravité étant une force constante, la roue du camion ou de la semi-remorque viendra en contact avec la cale et celle-ci, en raison de la conception particulière de son profil géométrique, ira chercher le maximum de résistance de la surface en contact avec le sol. Un déplacement antérieur du camion ou de la semi-remorque de trois pouces sera par contre nécessaire avant d'arriver à ce point, dans le cas de la cale proposée dans ce rapport. Cette

amplitude est toutefois quelque peu limitée compte tenu du chevauchement de la lèvre (4 pouces), calculé auparavant à la section 4.2. La cale contribuera aussi à limiter le déplacement antérieur de la semi-remorque induit par le freinage des chariots dans la plateforme (fonction primaire F0-3). Dans ce cas particulier, la cale interagira avec le pneu et la semi-remorque pourra potentiellement revenir à la position initiale malgré le fait qu'un déplacement antérieur de trois pouces aura eu lieu de la part de la semi-remorque.

Une contribution supplémentaire de la cale à l'immobilisation du camion ou de la semi-remorque serait possible par l'ajout d'un système de retenue de la cale au sol, mais ceci entraînerait des coûts et se ferait au détriment de la viabilité d'un tel système en conditions hivernales. Si un tel système est tout de même considéré, une attention particulière devrait être portée pour s'assurer de ne pas créer de bris du tracteur ou de renversement de la semi-remorque lors du départ inopiné du semi-remorque.

Tableau 6 Fonctions secondaires d'une cale de roue.

Fonction secondaire	Descriptif	Explicatif
F1	La roue ne doit pas passer par-dessus la cale	Éviter le 1 ^{er} mode de défaillance*
F2	La cale ne doit pas glisser antérieurement lorsqu'en contact avec la roue	Éviter le 2 ^e mode de défaillance
F3	La cale ne doit pas pivoter autour de son arête antérieure	Éviter le 3 ^e mode de défaillance
F4	La cale ne doit pas s'enfoncer dans le sol	Éviter le 4 ^e mode de défaillance
F5	La cale doit résister à la compression des pneus	Éviter le 5 ^e mode de défaillance
F6	La cale ne doit pas être expulsée lorsqu'en compression sous le pneu	Éviter le 6 ^e mode de défaillance
F7	La cale ne doit pas endommager le tracteur en cas de départ inopiné	Prévenir le bris d'équipement (ex. éviter une rupture de l'arbre de transmission)
F8	La cale ne doit pas faire renverser la semi-remorque sur le côté	Assurer la stabilité de la semi-remorque lorsqu'en contact avec les cales
F9	La cale doit être facile d'utilisation	Faciliter l'insertion, le retrait et l'entreposage

* Les modes de défaillance sont illustrés au Tableau 3.

7. DISCUSSION

L'objectif global du projet consistait à déterminer les critères de conception nécessaires afin d'optimiser la performance des cales de roue pour camions ou semi-remorques aux quais de chargement. Une meilleure compréhension de la mécanique des cales de roue nous a permis de déterminer que les cales pouvaient contribuer à la sécurité dans quatre conditions différentes qui constituent les fonctions primaires d'une cale :

1. Limiter le mouvement du camion ou de la semi-remorque sous l'action de la gravité;
2. Limiter le départ inopiné des camions ou semi-remorques;
3. Limiter le mouvement de la semi-remorque sous l'action du freinage de chariots élévateurs dans la semi-remorque;
4. Limiter le mouvement de rampement de la semi-remorque.

Il a été clairement expliqué que lors de la situation de rampement ("dock walk"), la cale mobile ne pouvait contribuer à limiter le mouvement de la semi-remorque, du moins pas plus qu'un système de freinage en état d'opération. Un système de retenue de la cale au sol est nécessaire. D'autres solutions peuvent être envisagées, dont l'utilisation d'un crochet de retenue à la barre d'encastrement (Benoît et Bélanger, 1997) ou l'utilisation de systèmes de barrure pour la suspension tel que le Posilok de SAF-Holland (Allemagne).

La capacité d'une cale mobile à retenir un camion est intimement liée à sa résistance au glissement au sol. Différentes solutions peuvent être considérées pour assurer une meilleure résistance dont l'ajout de rainures ou de grillages, ou même de mécanismes qui constituent des options théoriquement envisageables, mais peu pratiques pour le climat hivernal du Québec. Nous avons opté pour tirer profit du maximum de résistance de glissement au sol, sachant que ces dispositifs peuvent l'augmenter. Ceci nous permet d'éviter des modes de défaillances indésirables dont le passage par-dessus la cale, l'expulsion de la cale ou le pivotement de la cale.

Un modèle de cale, optimale au regard de la résistance au frottement au sol, a été élaboré en s'inspirant, d'une part, des travaux menés par Gauthier *et al.* (2006) et Buchser (1984) et, d'autre part, d'une analyse détaillée de la mécanique de base du fonctionnement d'une cale. Les résultats de notre étude démontrent clairement que le profil géométrique de la cale joue un rôle critique. Malheureusement, cet aspect ne semble pas être reconnu dans le domaine. D'ailleurs, la norme SAE J348, qui est prédominante, préconise une approche discutable, selon nous. Cette norme favorise un profil qui ne permet pas de bien maîtriser le phénomène de frottement au sol et, ainsi, de tirer profit de la résistance maximale au glissement du sol, peu importe son coefficient de frottement. Ceci peut expliquer pourquoi l'utilisation de cales ne semble pas être une solution reconnue efficace par tous sur le terrain. En effet, les cales qui utilisent le profil favorisé par la SAE J348 (maximum d'aire de contact avec le pneu) n'exploitent pas la pleine capacité de résistance de frottement au sol pour éviter un glissement antérieur de la cale. La cale que nous proposons exige un déplacement de trois pouces avant d'atteindre sa capacité maximale de retenue, mais elle présente l'avantage de pouvoir tirer profit de la résistance maximale en frottement du terrain, à moins que le coefficient de frottement de l'interface avec le sol soit hors des limites choisies lors du processus de conception, *c.-à-d.* entre 0,2 et 1,25. Des études plus

poussées permettraient de déterminer si un déplacement inférieur à trois pouces est possible et souhaitable.

L'utilisation de cales en paire est évidemment préférable pour éviter des débalancements de la semi-remorque et pour augmenter les capacités de retenue du camion ou de la semi-remorque. L'ajout de cales aux roues du tracteur est aussi une option envisageable pour améliorer la force de retenue du semi-remorque. Pour un départ inopiné, il est important de noter, par contre, que la force de résistance d'une cale, lorsqu'insérée au niveau des roues motrices, est moindre que dans le cas d'une roue non motrice, car le fait d'être une roue motrice permet de créer une force tangentielle à la surface postérieure de la cale. Cette force a comme effet de contribuer à soulever l'essieu par-dessus la cale. Cette situation particulière n'a pas été traitée dans ce rapport puisque, le tracteur n'étant pas toujours présent au quai, on ne peut considérer qu'elle sera toujours envisageable.

Le peu de littérature sur le sujet des cales de roues fait en sorte qu'il est difficile de quantifier précisément la performance de la cale que nous proposons. La littérature est particulièrement silencieuse concernant les exigences sur la raideur des cales. Étant donné les efforts importants en jeu, les activités de conception supplémentaires devraient s'attarder à mieux définir ce critère pour éviter, dans certains cas, des expulsions dangereuses des cales. Des tests plus précis de performance en raideur devraient par le fait même être développés pour déterminer comment les cales répondent à ce critère si critique. La norme SAE J348 est muette à ce sujet, autrement qu'en suggérant un test de résistance à la compression. Il est important de rappeler ici que la raison de cette absence d'exigences est que la cale est prévue pour immobiliser un véhicule à l'arrêt et que la confirmation d'avoir répondu à cette fonction suffit pour répondre à la norme.

L'approche initiale suivie dans ce projet a été basée sur la modélisation complexe du phénomène de blocage des cales. Des modèles ont été développés sur la plateforme de simulation ADAMS (MSC-Adams, USA), mais ces efforts n'ont pas été poursuivis, car une approche simplifiée de mécanique de blocage d'une cale de roue, secondée d'une maîtrise judicieuse de la géométrie de son profil, a permis de définir la plupart des critères de conception d'une cale. Une modélisation plus détaillée de la future cale sera par contre nécessaire lors de sa conception, afin d'éviter des ruptures résultant des efforts importants de compression en jeu et des problèmes de stabilité pouvant mener à son expulsion.

Il est important de rappeler à ce point qu'une cale qui ne possède pas de système de retenue au sol ne pourra jamais être plus performante qu'un système de freinage fonctionnel sur les roues de la semi-remorque. L'ajout d'un système de retenue peut certes améliorer la performance, mais pourrait engendrer d'autres défaillances qui doivent être évaluées avec soin.

8. CONCLUSIONS

Le présent rapport avait pour but de définir des critères de conception pour des cales de roues de camions ou de semi-remorques aux quais de chargement. La littérature étant particulièrement vierge dans ce domaine, les critères n'ont pu être établis avant d'avoir compris la mécanique de base des cales de roue. Les critères identifiés se sont limités à des notes à la conception (Tableau 4) et un nombre restreint de fonctions primaires (Tableau 5) et secondaires (Tableau 6). L'analyse de ces fonctions a permis de démontrer l'importance de cinq paramètres de conception d'une cale, soit le système de retenue au sol, le profil géométrique de la cale, sa raideur, le nombre de cales à utiliser et la raideur du sol en contact avec la cale.

Une analyse plus détaillée a démontré que le profil géométrique joue un rôle important afin de contrôler l'orientation de la résultante de la force de contact entre le pneu et la cale. Cette orientation est cruciale dans l'établissement de la performance d'une cale, en particulier sur sa résistance au glissement et sur sa stabilité. La raideur de la cale est aussi critique relativement à ces aspects, afin d'éviter plusieurs modes de défaillances observés chez les cales actuellement disponibles sur le marché. La conception de celles-ci est le plus souvent inspirée de la norme SAE J348. Cette norme n'indique cependant aucune exigence sur la raideur des cales et prescrit un profil qui nous apparaît inadéquat pour assurer un bon contrôle de la force de contact du pneu avec la cale et profiter ainsi de la résistance maximale du frottement au sol.

Nous avons choisi de ne pas fournir de critères plus détaillés sur la conception de cale, car plus d'un concept peut permettre de remplir les fonctions identifiées. Afin de démontrer qu'il existe bien un concept théorique qui permet de remplir ces fonctions, nous avons proposé un concept de cale pour une utilisation avec des camions ou semi-remorques. Des modèles mécaniques simplifiés du contact du pneu avec la cale ont permis d'établir la performance de cette cale malgré la complexité du phénomène de contact en jeu. Cependant, cette cale n'est présentement pas disponible sur le marché et une évaluation de sa performance devra être effectuée pour valider notre approche de conception.

Il est important de noter qu'une cale, sans système de retenue, peut présenter une résistance maximale similaire à celle procurée par le freinage d'un pneu au sol si elle est bien conçue. Par conséquent, la cale sert donc de dispositif palliatif pour le système de frein. Il ne s'agit pas d'un système de remplacement plus performant qu'un freinage, à moins de développer des interfaces de retenue au sol. Dans cet esprit, la cale peut certainement contribuer à limiter le départ inopiné d'un camion, mais elle ne pourra l'empêcher dans toutes conditions. La cale qui a été développée s'assure que le mode de défaillance qui sera observé pour un départ inopiné est le glissement antérieur de la cale par rapport au sol, et non le passage de la roue par-dessus la cale ou l'expulsion de la cale due à un pivotement de celle-ci, deux situations jugées plus dangereuses selon nous. Ce choix permet aussi de conserver une résistance à l'avancement du camion, même s'il y a défaillance, ce qui n'est pas le cas pour les deux autres modes de défaillance.

Les analyses présentées dans ce rapport ont aussi démontré qu'une cale de roue peut contribuer à améliorer l'immobilisation d'une semi-remorque à un quai de chargement, soit pour limiter son déplacement lorsqu'il est provoqué par le freinage d'un chariot élévateur sur la plateforme de la semi-remorque, soit par l'action de la gravité. Selon nos calculs, on peut s'attendre à un

déplacement de trois pouces de la semi-remorque avant que la cale proposée fournisse son maximum de force de retenue. Un tel déplacement se situe près de la limite inférieure de chevauchement entre la lèvre et le quai. Les cales, si elles ne sont pas ancrées au sol, ne peuvent pas empêcher le phénomène de rampement ("dock walking"), lequel nécessite des moyens de prévention alternatifs.

BIBLIOGRAPHIE

ADR Partie 8 (2010). Prescriptions relatives aux équipages, à l'équipement et à l'exploitation des véhicules et à la documentation, paragraphe 8.1.5.2., Nations Unies.

A-A-52475A (1993). Commercial item description, Chock, Wheel. 6 p.

Benoît, R. et Bélanger, M. (1997). Dispositifs d'ancrage de camions – Recueil d'informations techniques. IRSST, Montréal, Études et Recherche, Rapport R-165, 26 p.

Bouliane, P. et Dalière, M. (1986). Guide de prévention - Chariots élévateurs, Montréal, Québec: Association sectorielle Transport Entreposage.

Buchser, T. L. (1984). Engineering report No P-425. AD-A145 135, Aircraft Maintenance, Air Force, USA, 59 p.

Fancher, P. S., Ervin, R. D., Winkler, C. B. et Gillespie, T. D. (1986). A factbook of the mechanical properties of the components for single-unit and articulated heavy trucks. Phase I. Final report, 182 p.

Gauthier, F., Giraud, L., Bourbonnière, R., Bournival, S., Richard, J.-G. et Massé, S. (2006). Développement d'un outil d'évaluation des mesures de retenue des camions aux quais de transbordement (version corrigée). IRSST, Montréal, Études et recherche, Rapport R-381, 60 p.

Li, F., Hongbin G. et Hongyu Y. (2009). Restraint efficacy analysis and structure optimization for the design of airplane metal chocks. ICCTP: Critical issues in transportation systems planning, development and management, pp. 234-240.

Michelin (2013). Brochure descriptive du pneu XDA5, téléchargée le 5 avril 2013 du site <http://www.michelintruck.com/michelintruck/tires-retreads/tireInfo.do?tread=XDA5#>.

MIL-PRF-32058 (2003). Performance specification. Chock, Wheel-track-aviation, adjustable rope type. 12 pages.

MTQ (2005). Guide des normes de charges et dimensions des véhicules. Ministère des Transports du Québec.

NFPA 1901-31 (3-8.2) (2003). Report of the Committee on Fire Department Apparatus, log No 75.

Norme ISO 11228-1:2003. Ergonomie -- Manutention manuelle -- Partie 1: Manutention verticale et manutention horizontale.

OSHA Preambles (1998). Truck Training, Section 4 - IV. Studies of Accident and Injury Data and Training Effectiveness. Téléchargement de <http://www.osha.gov>, [Dernière consultation: décembre 2012].

OSHA 29 CFR Part 1910 (2013). Occupational Safety and Health Standards. Materials Handling and Storage. Powered industrial trucks. Paragraphe 1910.178 (k)(1). Téléchargé de <http://www.osha.gov>. [Dernière consultation: 28 avril 2013].

SAE J348 (1990). Wheel Chocks, Truck and Bus Chassis and Powertrain Committee, Society of Automotive Engineers, Warrendal. 5 p.

SAE AIR4905 (2002). Wheel chocks. 6 p.

Swietlik, W. (2005). Choosing the right vehicle restraint. Plant Engineering, Mars 2005, pp.78-80.

ANNEXE A

Vidéo présentant le phénomène de rampement de la semi-remorque, *c.-à-d.* le "dock walking"

<http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/annexes/r-863.mp4>