

EN004151**RAPPORT D'ENQUÊTE**

**Accident survenu à un conducteur de dépanneuse
de l'entreprise Remorquage Auclair inc.
le 1^{er} mars 2016
au 2480, chemin de la Canardière à Québec**

VERSION DÉPERSONNALISÉE**Direction régionale de la Capitale-Nationale****Inspecteurs :**

Stéphanie Deschamps

**Alexandra Miranda-Chang,
ing.****Date du rapport : 7 août 2017**

Rapport distribué à :

- Madame [A], [...], Remorquage Auclair inc.
- Docteur François Desbiens, directeur de la santé publique, région de la Capitale-Nationale

TABLE DES MATIÈRES

<u>1</u>	<u>RÉSUMÉ DU RAPPORT</u>	<u>1</u>
<u>2</u>	<u>ORGANISATION DU TRAVAIL</u>	<u>3</u>
2.1	STRUCTURE GÉNÉRALE DE L'ÉTABLISSEMENT	3
2.2	ORGANISATION DE LA SANTÉ ET DE LA SÉCURITÉ DU TRAVAIL	4
2.2.1	MÉCANISMES DE PARTICIPATION	4
2.2.2	GESTION DE LA SANTÉ ET DE LA SÉCURITÉ	5
<u>3</u>	<u>DESCRIPTION DU TRAVAIL</u>	<u>6</u>
3.1	DESCRIPTION DU LIEU DE TRAVAIL	6
3.2	DESCRIPTION DU TRAVAIL À EFFECTUER	7
3.2.1	CONTENEUR MARITIME	7
3.2.2	DÉPANNEUSE À PLATEAU	10
3.2.3	TREUIL	12
3.2.4	CHAÎNE	13
<u>4</u>	<u>ACCIDENT: FAITS ET ANALYSE</u>	<u>16</u>
4.1	CHRONOLOGIE DE L'ACCIDENT	16
4.2	CONSTATATIONS ET INFORMATIONS RECUEILLIES	16
4.2.1	LE CONDUCTEUR DE DÉPANNEUSE	16
4.2.2	UTILISATION DES ÉQUIPEMENTS AU MOMENT DE L'ACCIDENT	18
4.2.3	ANGLE DE LA CHAÎNE	21
4.2.4	COEFFICIENT DE FRICTION ET BLOCAGE MÉCANIQUE	21
4.2.5	ANALYSE MÉTALLURGIQUE DU MAILLON	25
4.2.6	CONTRAINTES CRÉÉES PAR LE CROCHET FERMÉ POSITIONNÉ SUR LE MAILLON	28
4.2.7	ANGLE DU PLATEAU	29
4.2.8	ANALYSE DES FORCES PRÉSENTES ET DE LA CHARGE APPLIQUÉE SUR LA CHAÎNE	30
4.2.9	POSITIONNEMENT DU CROCHET DU TREUIL DIRECTEMENT SUR UN MAILLON	31
4.2.10	UTILISATION SÉCURITAIRE DES CHAÎNES	31
4.2.11	INSPECTION DES CHAÎNES	32
4.2.12	MÉTHODES DE TRAVAIL ET FORMATION CONCERNANT LE TRANSPORT DE CONTENEUR CHEZ REMORQUAGE AUCLAIR INC.	32
4.2.13	LEVAGE D'UN CONTENEUR MARITIME SELON LES NORMES ISO	33
4.2.14	TRANSPORT SPÉCIALISÉ R.D.C. INC. ET ÉQUIPEMENTS ATTESTÉS À LA SUITE D'UN ACCIDENT SIMILAIRE	34
4.2.15	LOI SUR LA SANTÉ ET SÉCURITÉ DU TRAVAIL	35

4.3 ÉNONCÉS ET ANALYSE DES CAUSES 36

4.3.1 SOUMISE À DES CONTRAINTES QUI PROVOQUENT UNE SURCHARGE, LA CHAÎNE SE ROMPT ENTRAÎNANT AINSI LA PROJECTION DU CROCHET ET DU CÂBLE DU TREUIL SUR LE CONDUCTEUR DE DÉPANNEUSE. 36

4.3.2 DES LACUNES DANS LA GESTION DE LA SANTÉ ET DE LA SÉCURITÉ LORS DES MANŒUVRES DE CHARGEMENT D'UN CONTENEUR MARITIME ENTRAÎNENT L'UTILISATION D'UNE MÉTHODE DE TRAVAIL INADÉQUATE QUI PERMET LA SURCHARGE DE LA CHAÎNE. 37

5 CONCLUSION 39

5.1 CAUSES DE L'ACCIDENT 39

5.2 AUTRES DOCUMENTS ÉMIS LORS DE L'ENQUÊTE 39

5.3 RECOMMANDATIONS 39

ANNEXES

ANNEXE A : Accidenté 40

ANNEXE B : Liste des témoins et des autres personnes rencontrées 41

ANNEXE C : Rapport d'expertise du Centre de métallurgie du Québec 43

ANNEXE D : Rapport d'expertise de l'Université Laval 44

ANNEXE E : Références bibliographiques 45

SECTION 1**1 RÉSUMÉ DU RAPPORT****Description de l'accident**

Le 1^{er} mars 2016, un conducteur de dépanneuse de l'entreprise Remorquage Auclair inc. fait le chargement d'un conteneur maritime sur le plateau (plate-forme) de son véhicule. Pour ce faire, il installe une chaîne à la base du conteneur maritime pour tirer ce dernier sur le plateau. Il fixe ensuite le crochet du câble du treuil, situé sur le plateau, au milieu de cette chaîne. Lors de la manœuvre de chargement, la chaîne se rompt. Le crochet et le câble du treuil heurtent alors le conducteur de dépanneuse qui se trouve devant le boîtier de contrôle du plateau du véhicule.

Conséquences

Le conducteur de dépanneuse est blessé et transporté à l'hôpital. Il subit des lacérations et des contusions.



Photo 1 – Lieu de l'accident

(Source : CNESST)

Abrégé des causes

- Soumise à des contraintes qui provoquent une surcharge, la chaîne se rompt entraînant ainsi la projection du crochet et du câble du treuil sur le conducteur de dépanneuse
- Des lacunes dans la gestion de la santé et de la sécurité lors des manœuvres de chargement d'un conteneur maritime entraînent l'utilisation d'une méthode de travail inadéquate qui permet la surcharge de la chaîne

Mesures correctives

À la suite de l'accident, la CNEST interdit le déplacement du conteneur maritime impliqué dans l'accident (RAP1063239) ainsi que la méthode de travail consistant à utiliser des chaînes et un treuil pour tirer un conteneur maritime sur le plateau d'une dépanneuse (RAP1065551).

Le 24 mars 2016, le déplacement du conteneur maritime impliqué dans l'accident est autorisé en raison de l'utilisation d'un appareil de levage adéquat (RAP1054572).

Le 24 janvier 2017, le transport d'un conteneur maritime à l'aide d'une dépanneuse est autorisé. Un équipement est conçu et attesté par un ingénieur. Une méthode de travail sécuritaire est élaborée et les travailleurs sont formés sur cette méthode (RAP1102387).

Le présent résumé n'a pas de valeur légale et ne tient lieu ni de rapport d'enquête, ni d'avis de correction ou de toute autre décision de l'inspecteur. Il constitue un aide-mémoire identifiant les éléments d'une situation dangereuse et les mesures correctives à apporter pour éviter la répétition de l'accident. Il peut également servir d'outil de diffusion dans votre milieu de travail.

SECTION 2**2 ORGANISATION DU TRAVAIL****2.1 Structure générale de l'établissement**

Remorquage Auclair inc. offre des services de remorquage automobile et de transport d'équipements de chantier, de conteneurs maritimes et de différents matériaux. L'établissement emploie [...] travailleurs. Ceux-ci travaillent généralement seuls à divers endroits (terrains privés, stationnements, voies publiques, chantiers de construction, etc.) et dans des conditions météorologiques variables.

[...]. L'organisation du travail et la gestion chez Remorquage Auclair inc. s'effectuent en collaboration avec une autre entreprise de transport de juridiction fédérale : Transport spécialisé R.D.C. inc.

Cette collaboration touche les services suivants :

- Entretien et réparation des camions;
- Achat d'équipements;
- Lieu du stationnement des camions;
- Répartition des appels;
- Formation des travailleurs;
- Organisation et supervision du travail.

Les opérations de remorquage et de transport effectuées par les travailleurs de Remorquage Auclair inc. sont dirigées et supervisées par M. [B], [...] chez Transport spécialisé R.D.C. inc. [...] de Transport spécialisé R.D.C. inc., M. [C], effectue au besoin, la supervision sur le terrain des travailleurs de Remorquage Auclair inc. M. [D], [...] chez Transport spécialisé R.D.C. inc., est responsable de l'achat d'équipements pour Remorquage Auclair inc. ainsi que de l'entretien des dépanneuses et des équipements leur appartenant.

Les rôles et responsabilités de Transport spécialisé R.D.C. inc. dans l'organisation du travail de Remorquage Auclair inc. s'illustre ainsi:

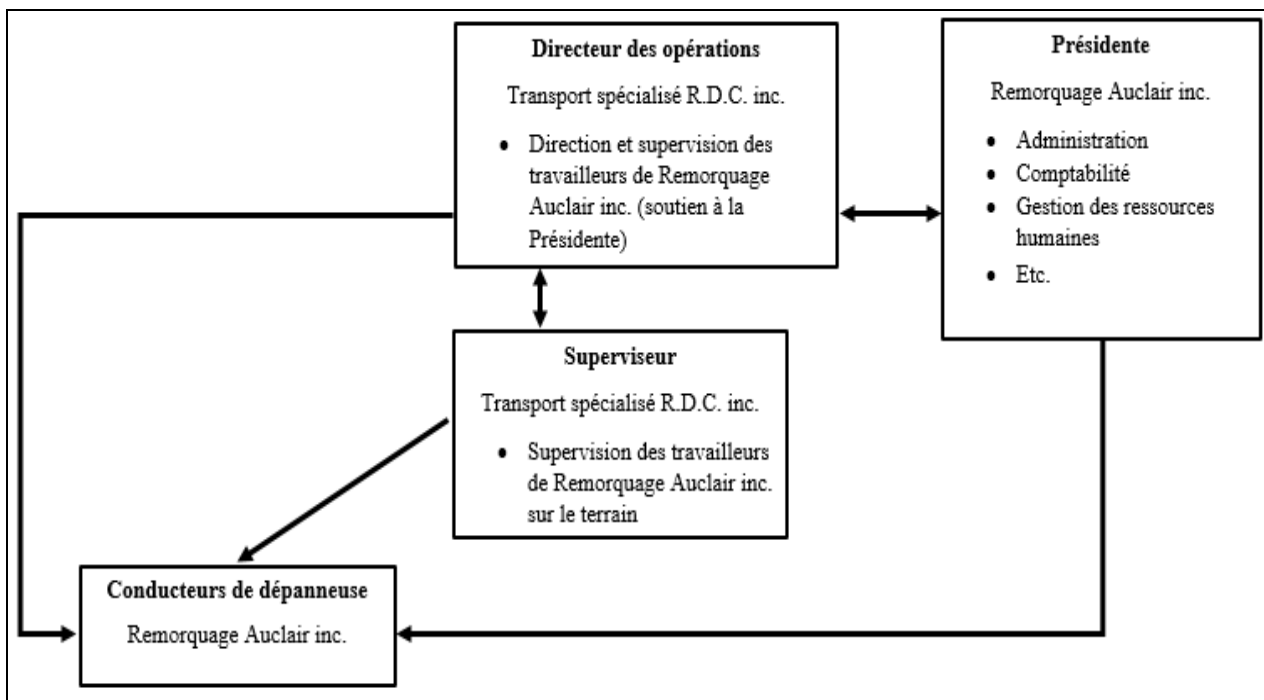


Schéma 1 – Organisation et gestion du travail de Remorquage Auclair inc.
(Source : CNESST)

L'entreprise possède neuf dépanneuses à plateau. Le service est offert sans interruption. Les opérations de dépannage et de transport couvrent le territoire de la ville de Québec, dans un rayon d'environ 160 kilomètres.

Au moment de l'accident, le conducteur de dépanneuse est seul sur le site puisque le remorquage d'un conteneur maritime s'effectue sans l'assistance d'autres travailleurs.

2.2 Organisation de la santé et de la sécurité du travail

2.2.1 Mécanismes de participation

Aucun mécanisme de participation formel des travailleurs n'est en place, tel un comité de santé et sécurité du travail. Les questions de santé et sécurité du travail sont abordées directement par les travailleurs lorsqu'elles se présentent. Les travailleurs s'adressent alors au [B] ou au [C] de Transport spécialisé R.D.C. inc.

2.2.2 Gestion de la santé et de la sécurité

L'entreprise fait partie du secteur d'activité – Autres services commerciaux et personnels. La gestion de la santé et sécurité du travail est assumée par [A] de Remorquage Auclair inc. et par [B] de Transport spécialisé R.D.C. inc.

La formation des nouveaux travailleurs s'effectue par jumelage sur une période d'environ une semaine. Les méthodes de travail à suivre sont transmises verbalement. Aucun document ne précise les méthodes de travail, ni les consignes de sécurité à enseigner. Les travailleurs reçoivent différentes formations concernant notamment, le transport de matières dangereuses, la vérification avant départ et l'arrimage des charges. Ces formations sont offertes afin de respecter la Loi concernant les propriétaires, les exploitants et les conducteurs de véhicules lourds, le Code canadien de sécurité pour les transporteurs routiers et le Code de la sécurité routière.

Certains équipements de protection individuelle sont fournis par l'employeur : dossard, casque, harnais de sécurité, etc. Leur port est exigé par certains maître-d'œuvre sur les chantiers de construction.

Par ailleurs, [...], un travailleur de Transport spécialisé R.D.C. inc. a subi un accident lors du chargement d'un conteneur maritime sur une remorque munie d'un treuil en utilisant une méthode de travail similaire à celle utilisée lors de l'accident du 1er mars 2016. Le travailleur a été blessé grièvement et conserve plusieurs atteintes permanentes.

SECTION 3**3 DESCRIPTION DU TRAVAIL****3.1 Description du lieu de travail**

L'accident s'est produit dans le stationnement arrière du 2480, chemin de la Canardière à Québec (photo 2).



Photo 2 – Lieu de travail

(Source : Google, modifiée par la CNESST)

Selon Environnement Canada, le 1^{er} mars 2016 à 10 h, le temps est généralement ensoleillé, la température est de -14,5 °C.

Il y a présence de neige et de glace devant et autour du conteneur maritime. De la neige est présente sous le plateau incliné et sur le long de celui-ci du côté du boîtier de contrôle. Il y a également présence de glace et de traces de glissement près des roues arrière du plateau de la dépanneuse.

3.2 Description du travail à effectuer

Le travail consiste à transporter un conteneur maritime appartenant à l'entreprise Les Constructions Pierre Blouin, à l'aide d'une dépanneuse dix roues munie d'un plateau. Ce transport doit s'effectuer du stationnement situé au 2480, chemin de la Canardière à Québec jusqu'au bureau de l'entreprise de construction. Pour ce faire, l'opérateur de dépanneuse doit d'abord charger le conteneur maritime sur le plateau. C'est lors de cette manœuvre que l'accident survient.

3.2.1 Conteneur maritime

Le conteneur maritime à transporter a été construit selon les normes internationales ISO. Il est sur place depuis le début de l'été 2015 et est utilisé pour entreposer des outils et du matériel sur les chantiers de construction. Lors de l'accident, le conteneur maritime contient une étagère vide et quelques boîtes de poignées de porte.

Le conteneur maritime présente les caractéristiques suivantes :

- Hauteur : 245 cm
- Largeur : 245 cm
- Longueur : 6058 cm
- Masse¹ approximative : 2268 kg
- Masse brute maximale² : 67 200 kg



Photo 3 – Conteneur maritime

(Source : CNESST)

Il s'agit d'un conteneur maritime de type 1C, c'est-à-dire servant à transporter de la marchandise.

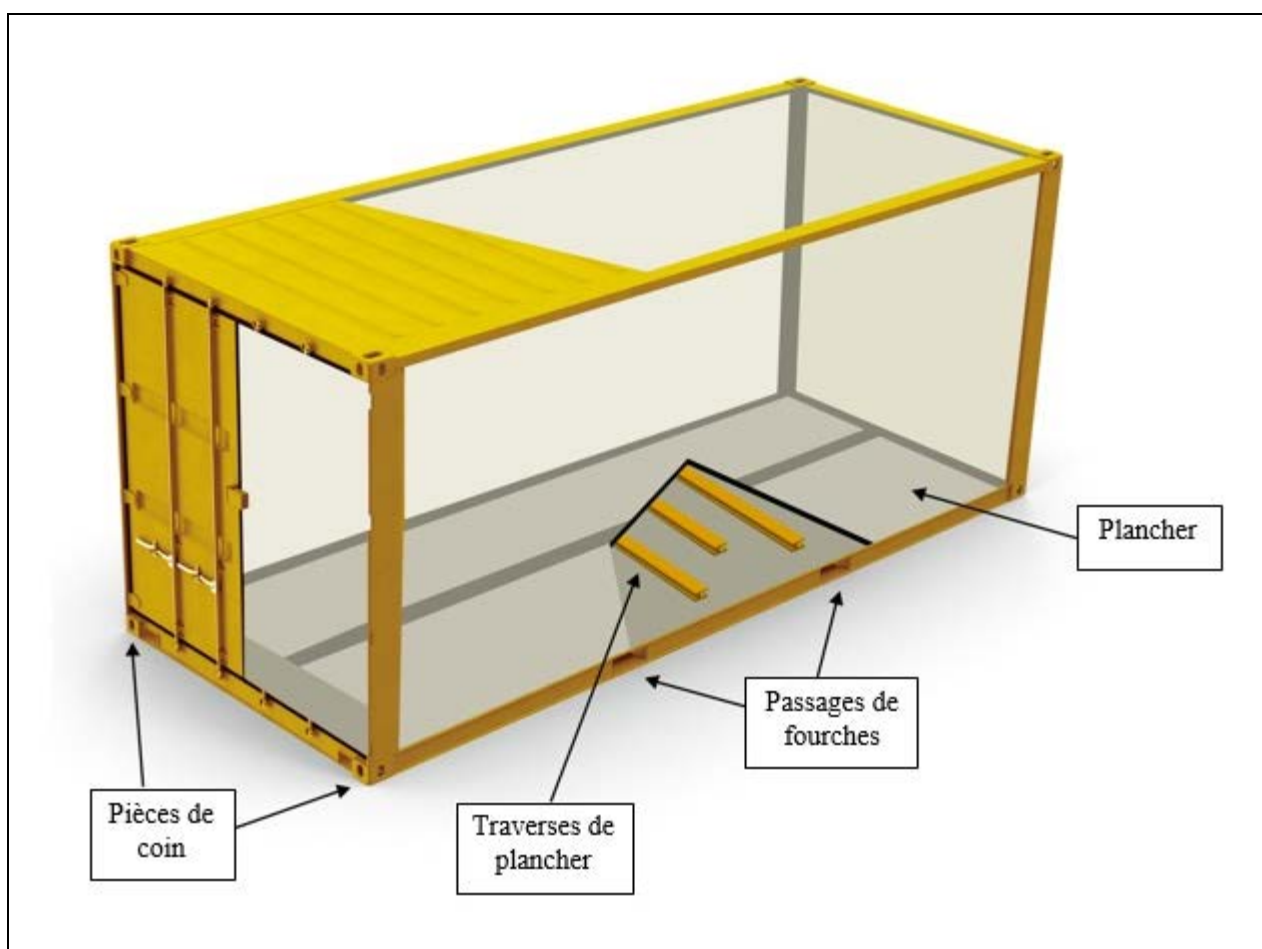
¹ Masse du conteneur maritime à vide.

² La masse brute d'un conteneur maritime indique sa capacité maximale en opération et la valeur minimale pour les essais.

Le conteneur maritime dispose de huit pièces de coin. Ces dispositifs sont situés à tous les coins du conteneur maritime et permettent de manutentionner celui-ci lors des opérations de gerbage ou d'élingage. Ils permettent également de l'arrimer lors des transports routiers.

Sous le plancher du conteneur maritime, il y a des traverses de plancher. Elles peuvent se comparer à des poutres métalliques qui se succèdent de façon régulière permettant de supporter le plancher et le contenu du conteneur maritime. Elles font toute la largeur du plancher. Elles s'apparentent à une cornière métallique (fer angle), soit une partie métallique en forme de « L ».

Deux passages de fourches permettent la préhension du conteneur maritime par des appareils de levage.



Croquis 1 – Structure d'un conteneur maritime

(Source : CNESST)

Les traverses de plancher sous le conteneur maritime à transporter lors de l'accident sont abimées (photo 4).

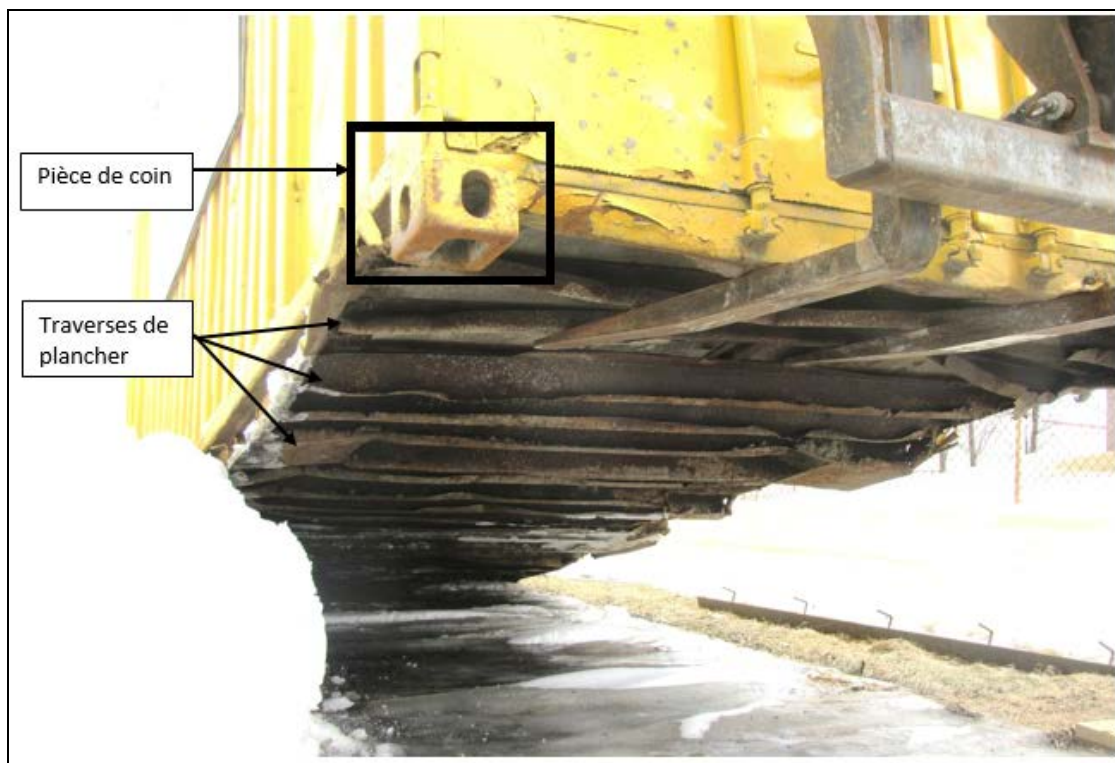


Photo 4 – Traverses de plancher sous le conteneur maritime
(Source : CNESST)

3.2.2 Dépanneuse à plateau

Caractéristiques de la dépanneuse :

- Marque : International Eagle 9300
- Année : 1998
- Nombre d'essieux : 3
- Numéro d'identification du véhicule (NIV) : 2HSFEBNR2JC012621

Caractéristiques du plateau :

- Fabricant : NRC Industries inc.
- Modèle : 40 000TB-25
- Capacité du plancher : 18 144 kg
- Longueur: 762 cm
- Numéro de série : NRC 277



Photo 5 – Dépanneuse à plateau
(Source : CNESST)

Le boîtier de contrôle regroupe cinq commandes hydrauliques pour manœuvrer le plateau. Ces commandes permettent un glissement horizontal du plateau ainsi que son inclinaison. Le treuil et le lève-roues sont également actionnés par ces commandes. Le boîtier est situé sous le plateau du côté conducteur (photo 6).



Photo 6 – Boîtier de contrôle du plateau
(Source : CNESST)

3.2.3 Treuil

La dépanneuse est munie d'un treuil hydraulique (photo 7).

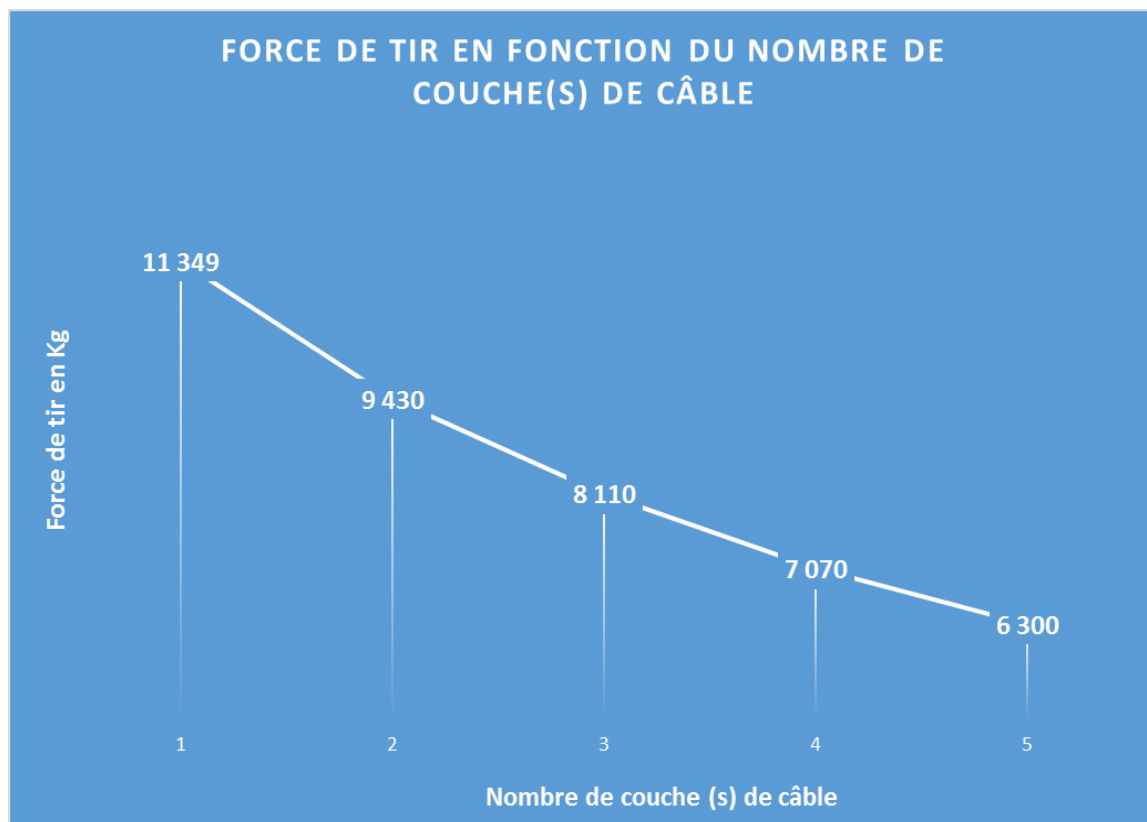
Caractéristiques du treuil :

- Marque : Ramsey
- Modèle : H-800
- Capacité : 11 349 kg
- Diamètre du câble d'acier : 16 mm
- Classification du câble : 6 brins, 19 torons
- Longueur du câble : 86,4 mètres



Photo 7 – Treuil
(Source : CNESST)

À l'extrémité du câble d'acier, il y a un crochet coulissant à manille (ci-après nommé crochet ouvert). Le crochet s'adapte au câble d'acier d'un diamètre de 16 mm. Il permet d'accrocher les véhicules et les charges à tirer sur le plateau. La force de tir maximale du treuil diminue proportionnellement au nombre de couche(s) de câble sur le tambour (graphique 1).



Graphique 1 – Force de tir du treuil

(Source : Ramsey, modifié par la CNESST)

3.2.4 Chaîne

Afin de tirer le conteneur maritime sur le plateau de la dépanneuse, une chaîne est installée à la base du conteneur maritime dans les deux pièces de coin avant. Le crochet du treuil est installé au milieu de cette chaîne directement sur les maillons. Il y a présence de corrosion sur l'ensemble de la chaîne et certains maillons présentent des signes d'élongation et de déformation. Il est impossible de déterminer avec précision depuis combien de temps cette chaîne est utilisée.

Caractéristiques de la chaîne:

- Manufacturier : Kinedyne
- Grade³ : 70
- Longueur : 3,20 m
- Calibre des maillons : 10 mm

³ Grade : Désignation conventionnelle, par un chiffre, qui caractérise la composition d'un matériau.

- Charge d'utilisation : 3 000 kg
- Charge de rupture: 11 204 kg (annexe C)
- Conçue pour faire de l'arrimage
- Conforme à la norme *National association of Chain Manufacturers* (NACM)

Une chaîne possède une charge d'utilisation (*working load limit*) qui varie selon son grade et son calibre.

La charge d'utilisation est la charge maximale qui peut être appliquée sur une chaîne dans une tension directe afin d'éviter de l'endommager. On entend par tension directe, une tension appliquée aux deux extrémités de la chaîne dans le sens opposé. Cette charge d'utilisation établie par le fabricant et les normes correspond à la charge maximale à faire supporter à une chaîne pour s'assurer d'une utilisation sécuritaire.

La charge d'utilisation ne correspond pas à la charge de rupture de la chaîne. Effectivement, la charge de rupture est la tension minimale requise pour rompre la chaîne. Par conséquent, les utilisateurs ne doivent jamais utiliser cette donnée pour déterminer si la chaîne peut lever ou tirer une charge. Ils doivent plutôt utiliser la charge d'utilisation.

Selon la norme NACM et le fabricant de la chaîne Kinedyne, la charge d'utilisation pour une chaîne de grade 70 neuve est de 3000 kg et la charge de rupture est établie à 12 000 kg.

La chaîne est munie de deux crochets aux extrémités : un crochet grappin à manille (ci-après nommé crochet fermé) et un crochet ouvert. Le crochet fermé (photo 8) se fixe sur les maillons de la chaîne de façon à permettre un ajustement de la longueur de la chaîne.

Caractéristiques du crochet fermé :

- Grade : 70
- Calibre : 10 mm
- Charge d'utilisation : 3 000 kg



Photo 8 – Crochet fermé
(Source : CNESST)

Caractéristiques du crochet ouvert (photo 9) :

- Grade : 70
- Calibre: 10 mm
- Charge d'utilisation : 3 000 kg



Photo 9 – Crochet ouvert
(Source : CNESST)

SECTION 4**4 ACCIDENT: FAITS ET ANALYSE****4.1 Chronologie de l'accident**

Le matin du 1^{er} mars 2016, [B] de Transport spécialisé R.D.C. inc. appelle le conducteur de dépanneuse et lui dit de joindre le service de répartition pour connaître ses tâches de la journée. Peu après 8 h 30, le service de la répartition l'informe du transport d'un conteneur maritime de l'entreprise les Constructions Pierre Blouin. Ce conteneur maritime se trouve au 2480, chemin de la Canardière à Québec. Vers 9 h 30, le conducteur de dépanneuse communique avec [E] qui lui mentionne que le conteneur maritime est possiblement gelé au sol. Le conducteur de dépanneuse lui explique alors qu'il va d'abord soulever l'avant du conteneur maritime afin de s'assurer de sa mobilité préalablement à son déplacement.

Une fois sur place, le conducteur de dépanneuse recule son véhicule le plus près possible du conteneur maritime. Ensuite, il déploie horizontalement le plateau avant d'amorcer son inclinaison vers le conteneur maritime. Il glisse l'extrémité du plateau sous la partie avant du conteneur maritime. Le conducteur de dépanneuse installe ensuite la chaîne dans les coins avant du conteneur maritime. Pour ce faire, il fixe le crochet ouvert dans l'ouverture située à l'avant de la pièce de coin à droite et passe le crochet fermé dans les deux ouvertures de la pièce de coin à gauche. Il installe ensuite le crochet fermé sur la chaîne de façon à tendre celle-ci au maximum, afin qu'elle soit le plus près possible du conteneur maritime. Ensuite, le conducteur de dépanneuse prend le crochet du treuil et l'installe au milieu de la chaîne ainsi tendue.

Le conducteur de dépanneuse actionne les commandes du plateau de façon à remettre ce dernier à l'horizontale. L'avant du conteneur maritime lève alors en suivant le mouvement du plateau. Le conducteur de dépanneuse juge alors que celui-ci n'est pas gelé dans le sol et il décide de procéder à la manœuvre de chargement.

Le conducteur de dépanneuse incline à nouveau le plateau afin de déposer le conteneur maritime au sol. Les deux pièces de coin avant reposent alors sur l'extrémité du plateau. Le conducteur de dépanneuse actionne le treuil de façon à tendre son câble, sans appliquer de tension sur la chaîne. Il remonte légèrement le plateau afin de dégager l'espace nécessaire pour introduire davantage le plateau sous le conteneur maritime. Il incline à nouveau le plateau afin que l'extrémité touche le sol. Cette opération crée une perte de tension dans le câble du treuil. Il actionne le treuil afin de tendre le câble à nouveau dans le but de faire monter le conteneur maritime sur le plateau. Lorsqu'il actionne le treuil, la chaîne se rompt. Le conducteur de dépanneuse reçoit le crochet ainsi que le câble du treuil sur le torse puis il tombe au sol, à côté du plateau. Les secours sont appelés et le conducteur de dépanneuse est transporté à l'hôpital.

4.2 Constatations et informations recueillies**4.2.1 Le conducteur de dépanneuse**

[...], le conducteur de dépanneuse est embauché. Ses tâches consistent à remorquer, arrimer et transporter des véhicules, de la machinerie, des matériaux et des conteneurs maritimes à l'aide

d'une dépanneuse à plateau. Pour ce faire, il utilise le treuil du plateau et différents équipements (chaînes, tendeurs, etc.) disponibles sur le plateau.

À son embauche, le conducteur de dépanneuse possède un permis de conduire classe 5. Il s'agit du permis requis pour conduire une automobile au Québec. Ce permis permet de conduire, en plus des automobiles, une habitation motorisée, un véhicule-outil, un cyclomoteur, un tracteur ainsi qu'un véhicule de service tel qu'une dépanneuse, peu importe le nombre d'essieux et la masse du véhicule.

Le conducteur de dépanneuse est formé par un collègue expérimenté sur une période de deux jours. Pendant cette période, il effectue quelques manœuvres de chargement lors desquelles le formateur lui indique les méthodes à suivre. Ses premiers dépannages et transports sont effectués avec une dépanneuse à plateau à deux essieux.

Au printemps [...], un premier transport de conteneur maritime est assigné au conducteur de dépanneuse. Un travailleur expérimenté l'accompagne pour lui enseigner la méthode de travail à suivre et l'assister lors des différentes manœuvres. Cette même méthode de travail est utilisée lors de l'accident.

À l'automne [...], le conducteur de dépanneuse a complété des formations concernant les matières dangereuses, la conduite préventive et la Loi 430, volet conducteur.

Selon les demandes et les périodes de l'année, les jours de travail varient du lundi au dimanche et le travail s'effectue de jour, de soir ou de nuit. Le conducteur de dépanneuse n'est pas syndiqué. Il est payé selon un pourcentage du coût total du transport ou du remorquage effectué.

En septembre [...], le conducteur de dépanneuse a débuté une formation professionnelle de transport par camion au Centre de formation en transport de Charlesbourg. En cours de formation, le conducteur de dépanneuse a obtenu un permis de conduire classe 1 permettant de conduire l'ensemble des véhicules routiers.

4.2.2 Utilisation des équipements au moment de l'accident

La chaîne de grade 70 est installée à la base du conteneur maritime. Dans le coin gauche du conteneur maritime, l'extrémité de la chaîne munie du crochet fermé est passée dans les deux ouvertures de la pièce de coin et la chaîne est ramenée sur elle-même de façon à former une boucle autour du coin. Le crochet fermé est alors installé sur la chaîne, ce qui permet de fermer la boucle. Sur le coin droit du conteneur maritime, le crochet ouvert est inséré dans l'ouverture avant de la pièce de coin du conteneur maritime (photo 10).

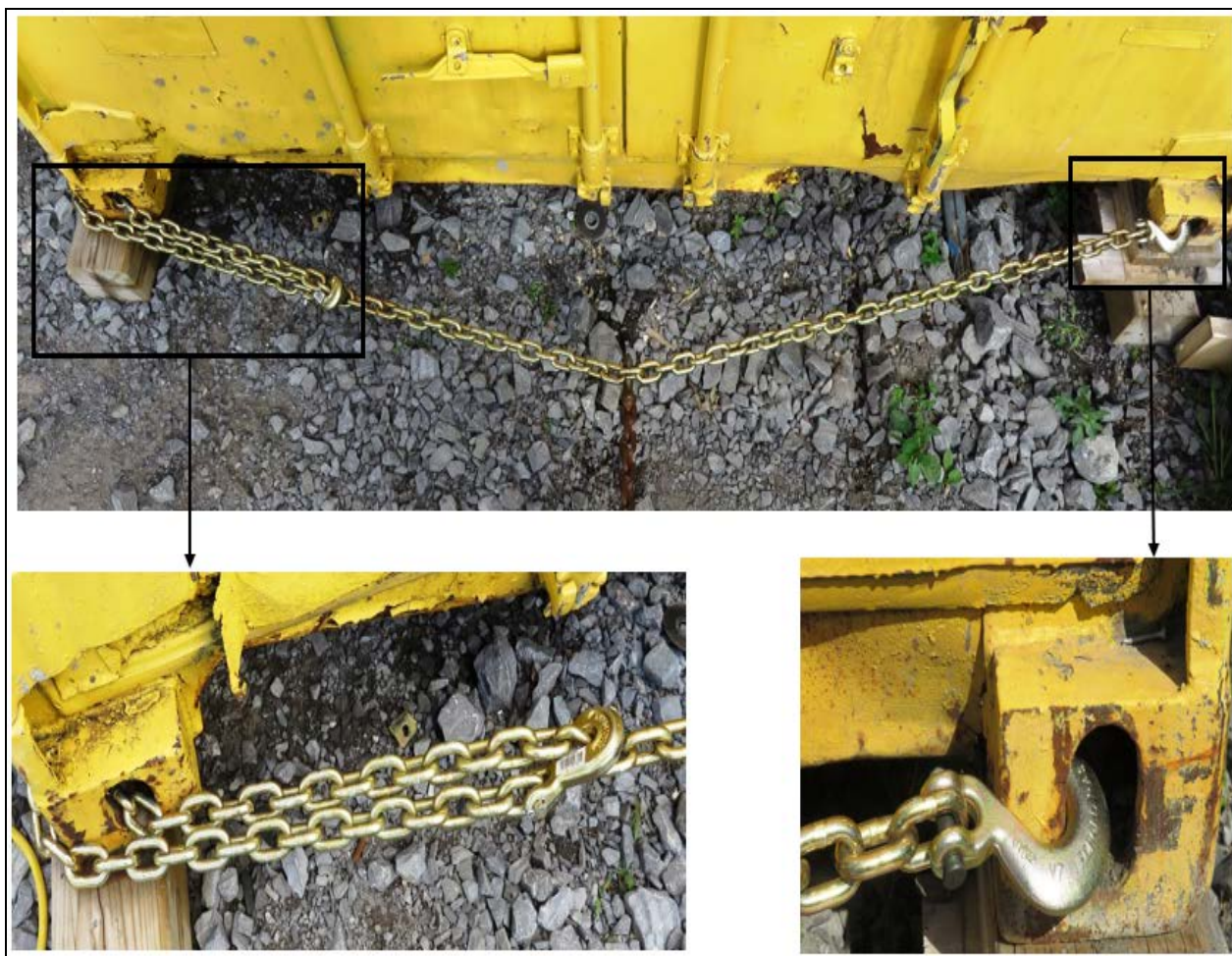
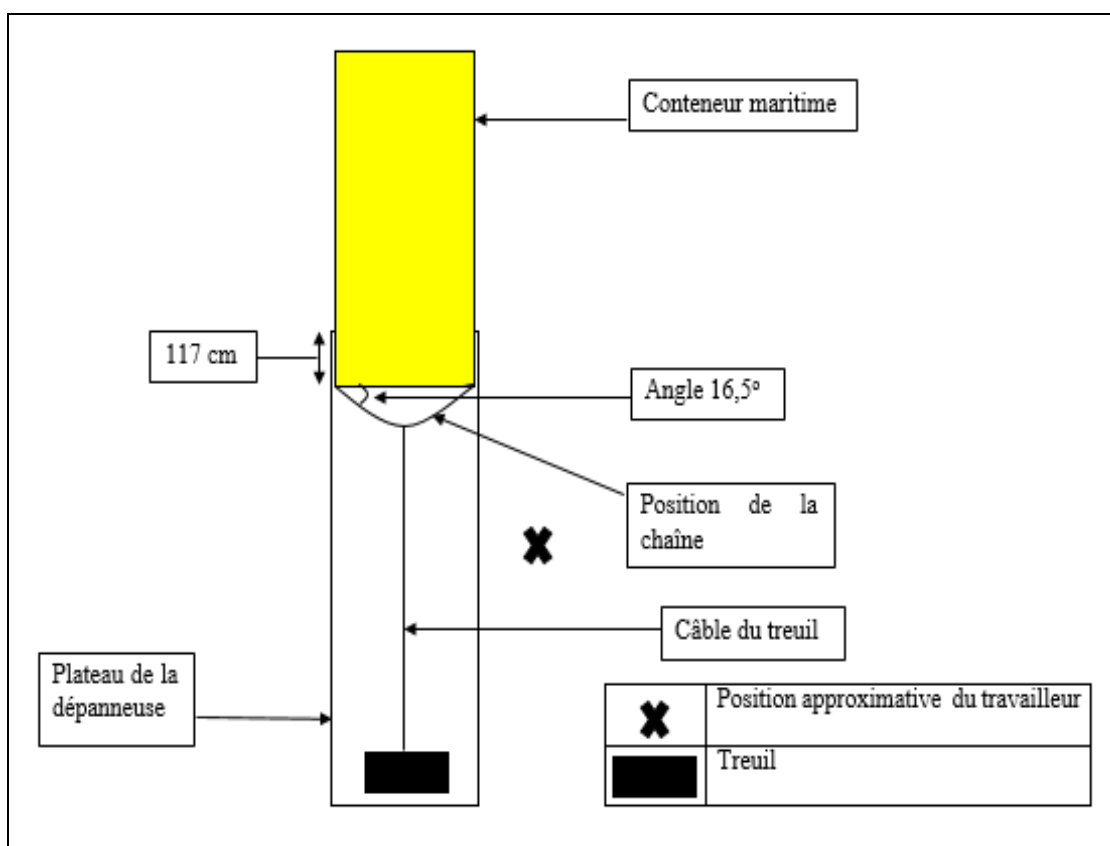


Photo 10 – Installation de la chaîne et des crochets à la base du conteneur maritime
(Source : CNESST)

La chaîne est tendue par le conducteur de dépanneuse afin qu'elle soit le plus près possible de la base du conteneur maritime. Cette façon de faire permet de contrôler la direction du conteneur maritime lorsque celui-ci est tiré sur le plateau. Au départ, le conducteur de dépanneuse place le crochet du treuil au centre de la chaîne. Si le centre de la base du conteneur maritime ne s'aligne pas au centre du plateau, le conducteur de dépanneuse déplace le crochet du treuil vers la gauche ou vers la droite de façon à contrôler la direction du conteneur maritime.

Selon la reconstitution effectuée, l'angle formé par la chaîne et le conteneur maritime lors de l'accident est estimé à 16,5°. Le plateau de la dépanneuse est glissé sous le conteneur maritime qui prend place sur une distance de 117 cm (croquis 2).

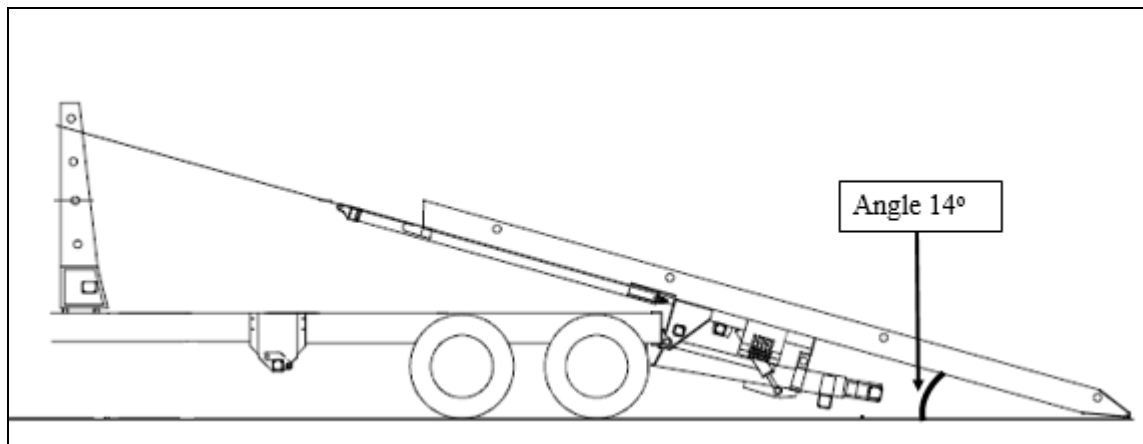


Croquis 2 – Vue en plan de l'installation pour les manœuvres de chargement

(Source : CNESST)

Le câble du treuil est déployé sur une distance de 615 cm et le crochet est fixé au milieu de la chaîne directement sur les maillons. On estime à trois le nombre de couches de câble sur le tambour du treuil. La capacité de tir est donc évaluée à 8110 kg.

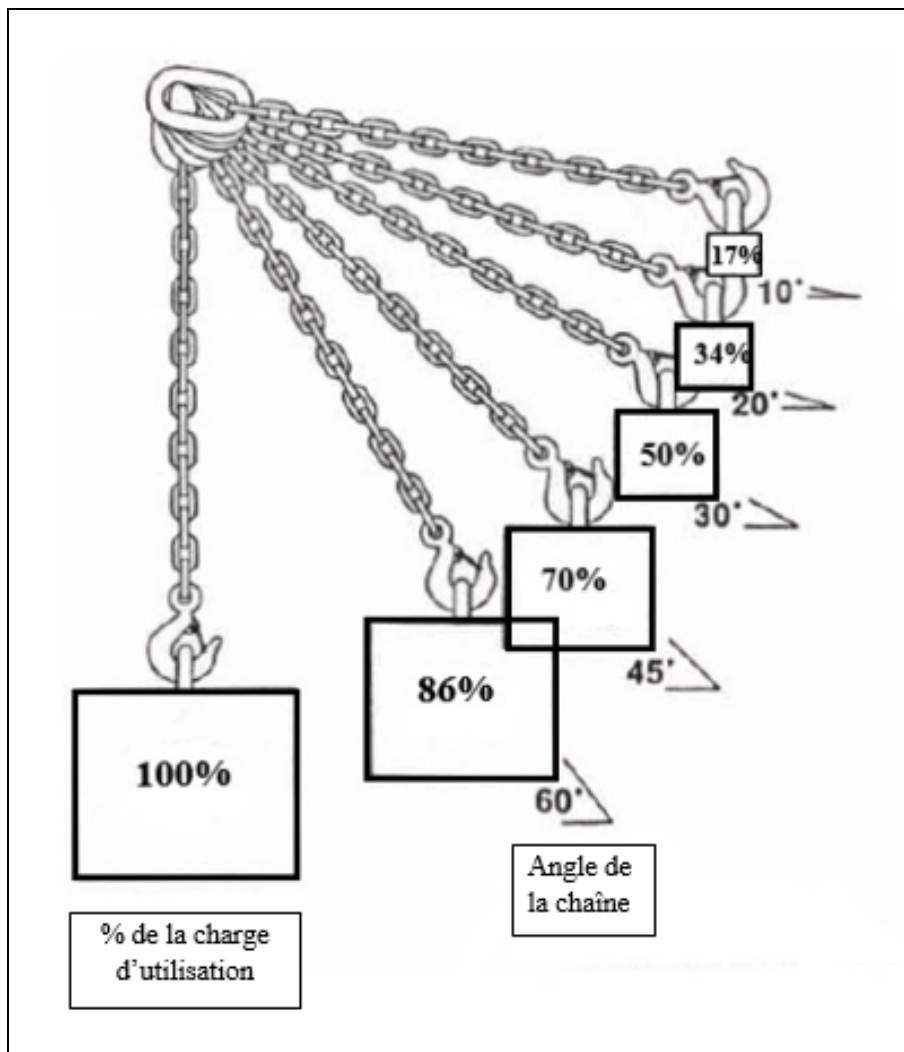
Le plateau de la dépanneuse est incliné par rapport au sol. L'angle formé entre le plateau et le sol est estimé à 14° (croquis 3).



Croquis 3 – Vue latérale du plateau de la dépanneuse
(Source : NRC Industries, modifié par la CNESST)

4.2.3 Angle de la chaîne

Les normes et le guide des fabricants de chaînes spécifient que la charge d'utilisation sur une chaîne diminue corrélativement à la réduction de l'angle entre la chaîne et la charge. Ainsi, plus l'angle est faible, plus la tension exercée sur la chaîne est élevée. Le croquis 4 illustre cette corrélation pour une charge soulevée verticalement. Lors de l'accident, l'angle entre la chaîne et la base du conteneur maritime est d'environ 16,5°.



Croquis 4 – Impact de l'angle de la chaîne sur la charge maximale admissible

(Source : Industrie Lam-É inc., modifié par la CNESST)

4.2.4 Coefficient de friction et blocage mécanique

Pour réussir à déplacer une charge, un coefficient de friction doit être déterminé, celui-ci se définit comme la difficulté avec laquelle la surface d'un matériau va glisser sur une autre surface. Dans le cas du déplacement d'un conteneur maritime sur le sol, la masse de celui-ci ne peut être utilisée à

elle seule pour déterminer la charge de travail appliquée sur la chaîne utilisée puisque le coefficient de friction n'est pas nul. En effet, la surface du sol et celle de la partie inférieure du conteneur maritime ne sont pas parfaitement lisses.

De plus, comme la partie inférieure du conteneur maritime est constituée de traverses de plancher, celles-ci peuvent entraîner un blocage mécanique avec le sol ou avec le plateau de la dépanneuse. Par exemple, la neige ou la glace peut se loger entre les traverses de plancher et empêcher soudainement le déplacement du conteneur maritime. Un blocage peut également survenir à la suite d'un contact entre une traverse de plancher et l'extrémité du plateau (photo 11). Par conséquent, ces blocages présentent une résistance au mouvement, entraînent l'application d'une charge soudaine sur la chaîne qui augmente la tension dans celle-ci et qui rend possible l'atteinte de sa charge de rupture.

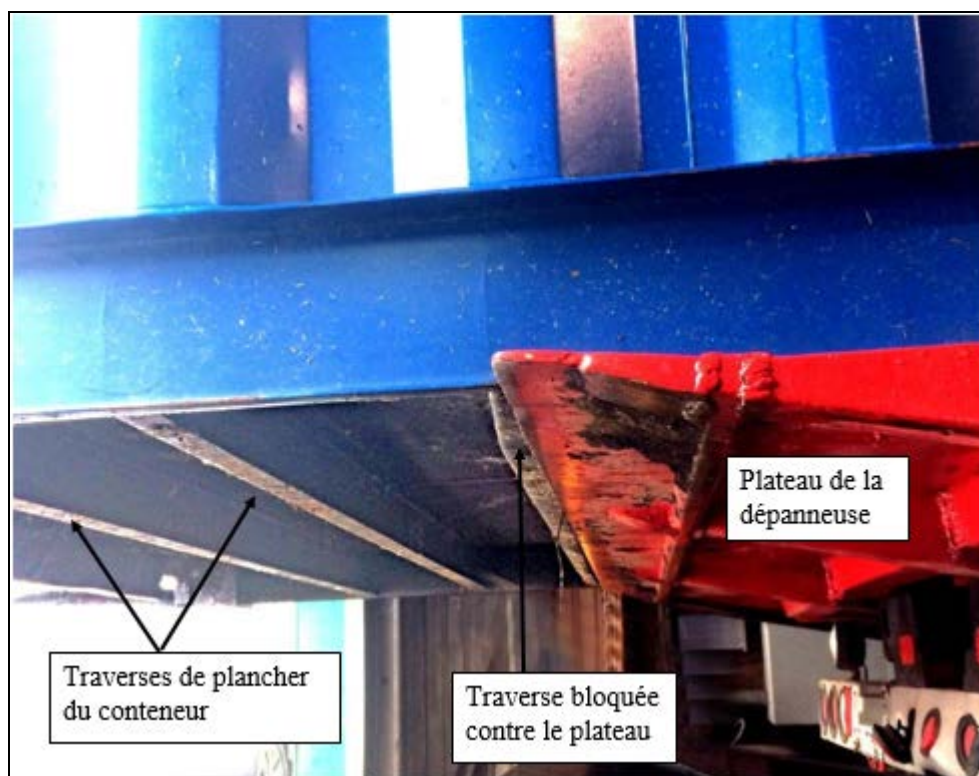


Photo 11 – Blocage d'une traverse de plancher de conteneur maritime
(Source : CNESST)

Le conteneur maritime a été mis en place sur une surface gazonnée au mois de juillet 2015 par l'entreprise qui en est propriétaire. À la fin de l'été 2015, les travailleurs de Les Constructions Pierre Blouin ont surélevé l'avant du conteneur maritime afin d'ouvrir les portes. Effectivement, comme le conteneur maritime s'était enfoncé dans le sol, des planches de bois ont été placées sous les pièces de coin avant de celui-ci. Le conteneur maritime n'a jamais été déplacé depuis sa mise en place. Comme l'arrière du conteneur maritime repose sans mesure de surélévation et sur le même type de sol que l'avant, il est justifié d'envisager que les pièces de coin situées à l'arrière du conteneur maritime se sont également enfoncées dans le sol. Ainsi, au moment de l'accident, le sol ayant épousé la forme des pièces de coin et des traverses de plancher, le conteneur maritime est figé dans le sol gelé (photos 12 et 13).



Photos 12 et 13 – Surface sous le conteneur maritime les 24 mars et 19 avril 2016

(Source : CNESST)

Le jour de l'accident, les pièces de coin arrière du conteneur maritime sont enveloppées d'une couche de glace d'environ 7 cm (photos 14 et 15).



Photos 14 et 15 – Pièce de coin arrière droit du conteneur maritime les 1^{er} et 15 mars 2016

(Source : CNESST)

Le 24 mars 2016, lorsque le conteneur maritime est déplacé, de la glace est présente sur les pièces de coin ainsi que sur les longerons latéraux (photo 16). Cette glace est retirée par le travailleur afin de procéder à l'arrimage du conteneur maritime sur le plateau. De plus, lorsque le conteneur maritime est soulevé, le sol sous ce dernier est glacé. Cette couche de glace présente des rainures indiquant que les traverses du plancher étaient figées dans la glace. Ces rainures de glace peuvent provoquer un blocage du conteneur maritime lors des manœuvres de chargement pour hisser celui-ci sur le plateau.



Photo 16 – Présence de glace sur les longerons latéraux du conteneur maritime

(Source : CNESST)

Le jour de l'accident, une fois le treuil actionné pour tirer le conteneur maritime, la chaîne se rompt dès que la tension est appliquée par le câble du treuil. Le conteneur maritime est toujours à sa position initiale. Selon l'expertise de l'Université Laval présentée à l'annexe D, ce fait indique un blocage au sol ou un coefficient de friction très élevé.

Lorsque le conteneur maritime est tiré vers le plateau de la dépanneuse, la résistance ou un blocage au sol peut créer des charges soudaines sur le câble du treuil et sur la chaîne. Ainsi, la succession de relâchements et de blocages entraîne plusieurs charges soudaines à la chaîne ayant comme effet la dégradation de la chaîne et, par le fait même, une diminution de sa charge d'utilisation et de rupture. L'estimation de ces charges soudaines est impossible à déterminer par l'utilisateur. Ceci entraîne donc des risques de dépassement de la charge de rupture de la chaîne, et par conséquent provoquer une surcharge et la rupture de maillons.

4.2.5 Analyse métallurgique du maillon

Selon l'expertise du Centre de métallurgie du Québec présentée à l'annexe C, le maillon cassé est situé à l'endroit où le crochet fermé était posé afin de former la boucle de la chaîne (photo 17).

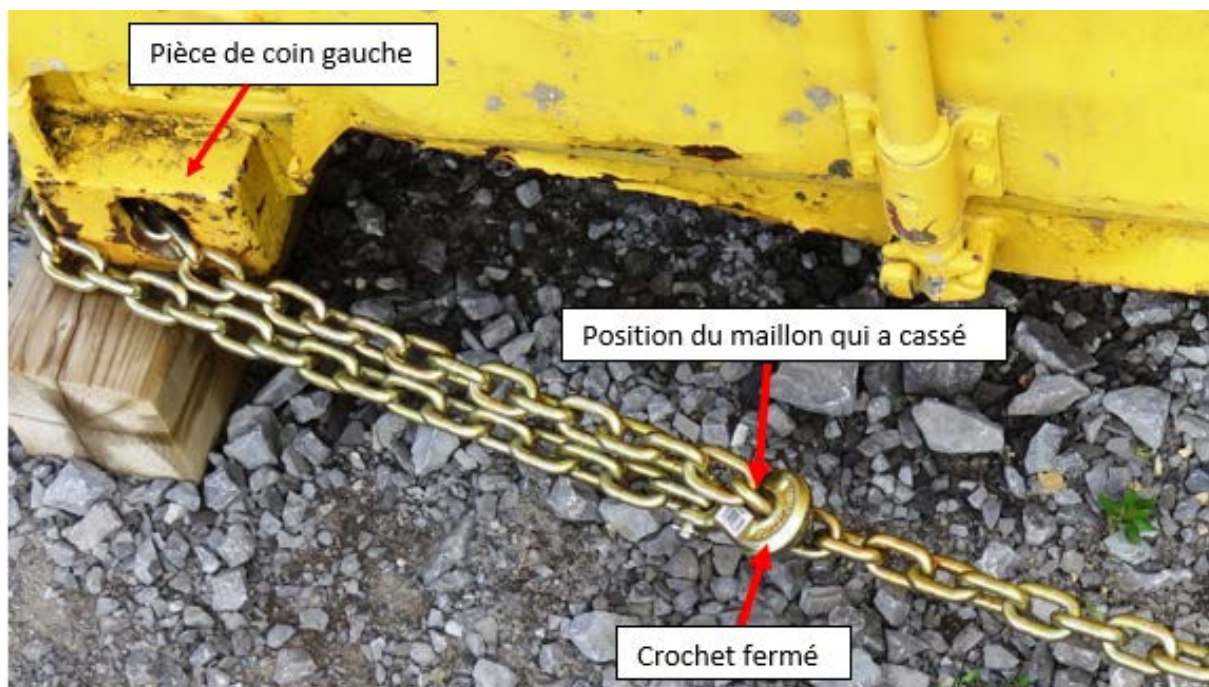


Photo 17 – Reconstitution de l'installation de la chaîne lors de l'accident
(Source : CNESST)

Le maillon brisé présente deux surfaces différentes de rupture, une surface à angle de 45° et la seconde à angle de 90° (photo 18). Les deux surfaces de rupture présentent de la striction⁴. Celle-ci indique un effet d'étirement lent sous une surcharge et apparaît juste avant une rupture.

La présence de forces excessives de flexion et de traction agissant simultanément au même endroit explique le bris à 45° . Ce bris est donc occasionné par une force de flexion latérale excessive sur la chaîne, jumelé à une surcharge en traction. Le bris à 90° est pour sa part le résultat d'une force de traction unidirectionnelle excessive, donc une surcharge. Les forces de flexion (en rouge) et de traction (en bleu) sont représentées par les flèches sur la photo 18.

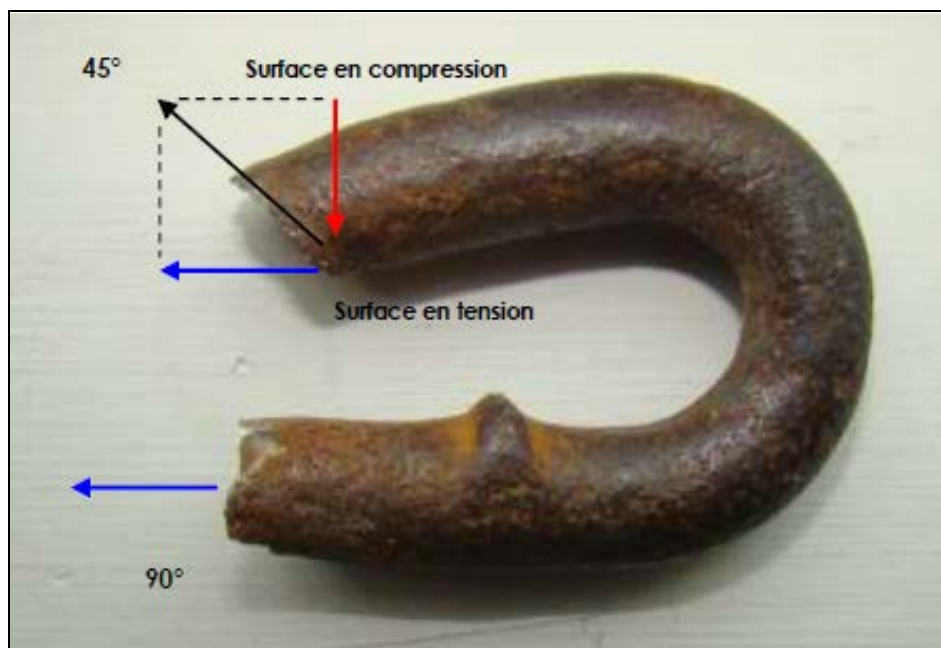


Photo 18 – Forces de traction et de flexion

(Source : Centre de métallurgie du Québec)

La force de flexion s'explique par la présence du crochet fermé sur le maillon. En effet, le crochet fermé exerce une traction latérale (force de flexion identifiée par la flèche rouge) qui subit simultanément un étirement alors qu'une charge supérieure à la charge de rupture de la chaîne est appliquée.

⁴ Striction : Réduction de section sur le maillon.

La présence de déchirure en V sur la surface latérale du maillon témoigne d'un effet de surcharge jumelé à un effet de flexion localisé (photo 19). De plus, les dommages causés par la corrosion facilitent le déchirement de l'acier.

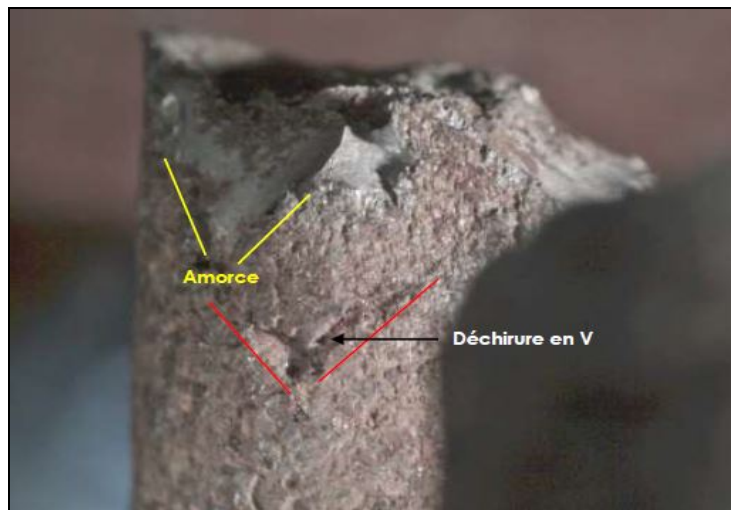


Photo 19 – Déchirement par flexion du maillon

(Source : Centre de métallurgie du Québec)

L'essai de traction effectué sur la chaîne utilisée lors de l'accident établit sa charge de rupture à 11 204 kg. La corrosion sévère et l'état d'usure de cette chaîne expliquent cette différence entre la charge de rupture réelle et celle établie par le fabricant à 12 000 kg.

4.2.6 Contraintes créées par le crochet fermé positionné sur le maillon

À gauche du conteneur maritime, la chaîne est introduite dans les deux ouvertures de la pièce de coin et installée de façon à former une boucle. Le crochet fermé est installé directement sur un maillon de la chaîne.

Des simulations numériques par éléments finis présentées dans le rapport d'expertise de l'Université Laval démontrent que les niveaux de contraintes⁵ dans un maillon subissant seulement une traction sont moins élevés que ceux dans le maillon subissant l'emprise du crochet fermé en plus d'une traction (figures 1 et 2). Les contraintes représentent l'effet des forces exercées sur un matériau.

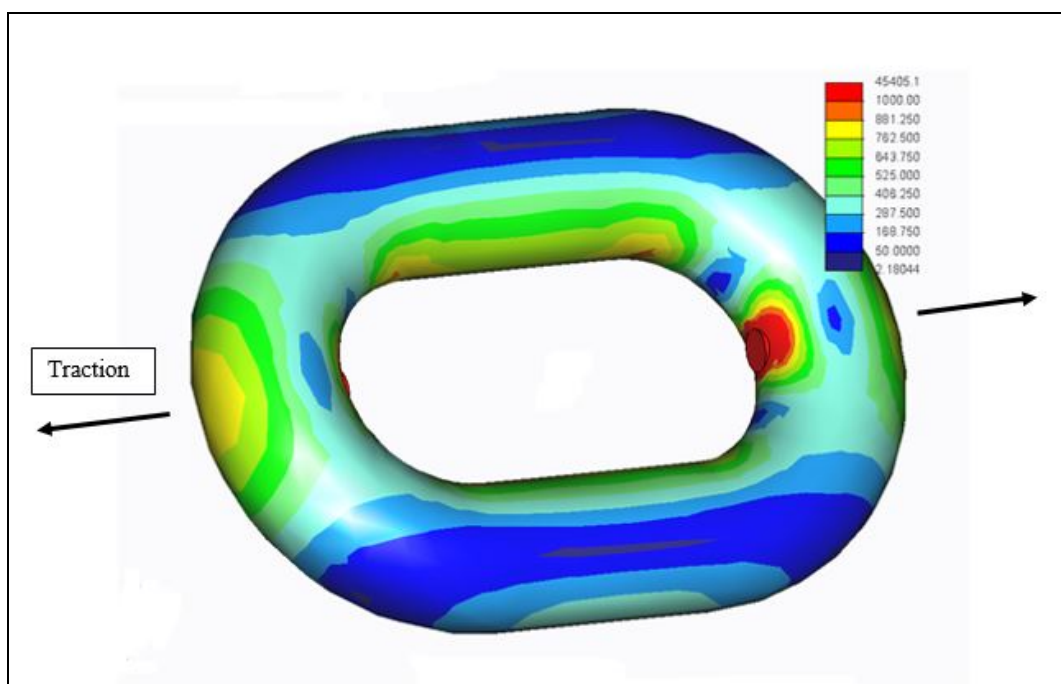


Figure 1 – Contraintes présentes dans un maillon soumis à une traction

(Source : Université Laval, modifiée par la CNESST)

⁵ Contraintes : Intensité, en un point d'un corps, des forces internes (ou des composantes) qui agissent sur un plan de surface unitaire passant par ce point.

L'augmentation des niveaux de contraintes est attribuable à la force latérale imposée par le crochet (contrainte de flexion) ainsi qu'à la tridimensionnalité de la géométrie. Ces simulations appuient les conclusions du rapport d'analyse métallurgique fourni par le Centre de métallurgie du Québec.

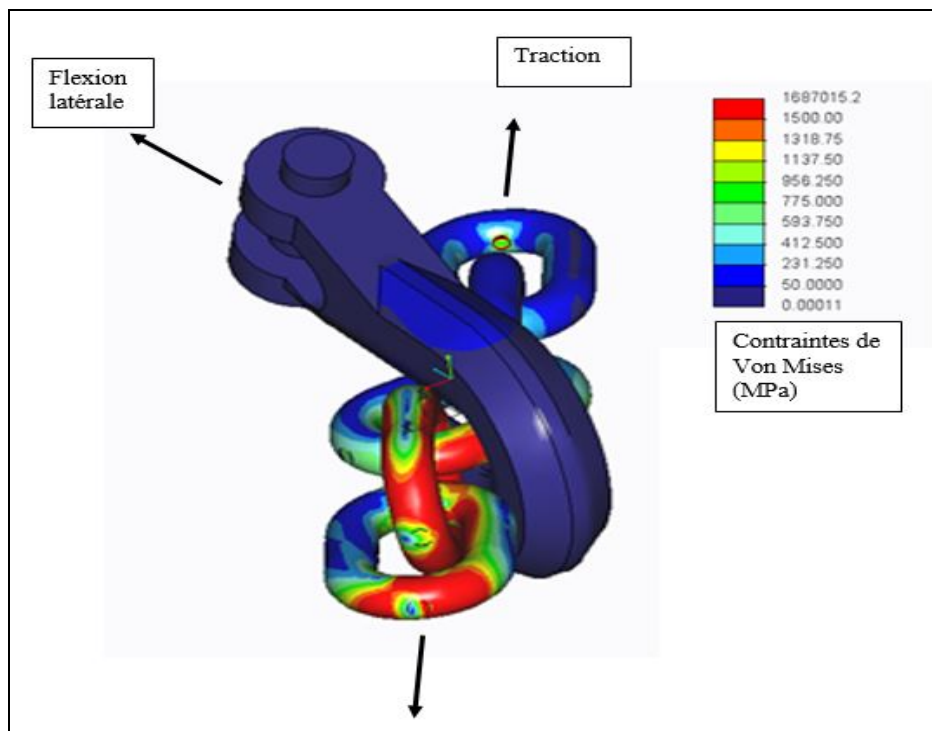


Figure 2 – Contraintes dans le maillon soumis à une traction et à une flexion latérale

(Source : Université Laval, modifiée par la CNESST)

4.2.7 Angle du plateau

L'inclinaison du plateau de la dépanneuse est nécessaire pour tirer le conteneur maritime sur celui-ci. L'angle d'inclinaison est de 14° au moment de l'accident. Le treuil doit déployer une force additionnelle afin de glisser le conteneur maritime sur le plateau incliné. Selon l'expertise de l'Université Laval, cette force additionnelle est de 544 kg lors de la montée du conteneur maritime.

4.2.8 Analyse des forces présentes et de la charge appliquée sur la chaîne

Tel qu'indiqué dans l'expertise de l'Université Laval, la tension (T) dans la chaîne résulte de la force (F) du treuil appliquée par son câble et de l'angle (α) que prend la chaîne par rapport au conteneur maritime.

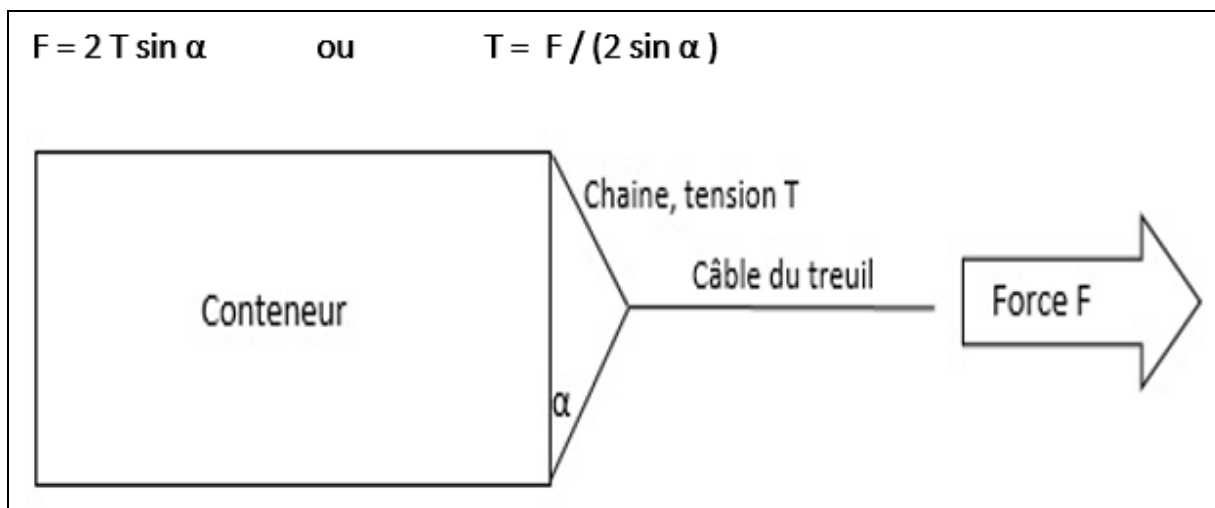


Schéma 2 – Analyse des forces présentes

(Source : Université Laval)

La force appliquée par le treuil dépend de la charge qui est réellement tirée. Cette charge est déterminée par le poids du conteneur maritime, le coefficient de friction, l'angle du plateau et l'effet d'un blocage.

Une première analyse démontre l'effet de l'angle de la chaîne sur la tension exercée sur celle-ci. En prenant l'hypothèse que la force appliquée par le treuil est de 2270 kg, soit uniquement le poids du conteneur maritime, il est possible d'évaluer la tension exercée sur la chaîne en fonction de l'angle qu'elle forme par rapport à la base du conteneur maritime (tableau 2).

Angle de la chaîne	Tension exercée
$\alpha 5^\circ$	13 009 kg
$\alpha 10^\circ$	6532 kg
$\alpha 15^\circ$	4382 kg
$\alpha 16,5^\circ$	3993 kg
$\alpha 20^\circ$	3316 kg
$\alpha 22^\circ$	3025 kg
$\alpha 25^\circ$	2685 kg

Tableau 2 – Incidence de l'angle de la chaîne sur la tension

(Source : CNESST)

Ainsi, il est démontré que l'angle de la chaîne est un paramètre important sur la tension exercée sur celle-ci. Effectivement, sans même ajouter de coefficient de friction ou les effets d'un possible blocage, la charge d'utilisation de la chaîne est atteinte lorsque l'angle de la chaîne est de 22°.

Lors de l'accident, la chaîne forme un angle d'environ 16,5° par rapport à la base du conteneur maritime. Il est possible de conclure, en appliquant cette hypothèse, que même sans considérer un coefficient de friction ou un blocage, la charge d'utilisation de la chaîne de grade 70 utilisée était dépassée au moment de l'accident. En effet, la charge d'utilisation de la chaîne est de 3000 kg alors que la tension dans la chaîne est d'au moins 3993 kg.

Une seconde analyse a été effectuée en prenant comme hypothèse un blocage au sol du conteneur maritime exigeant l'application de la force maximale du treuil, soit 8119 kg (à trois couches de câbles sur le tambour). Dans ces circonstances, avec une chaîne formant un angle de 16,5°, la tension exercée sur cette chaîne pouvait atteindre 14 294 kg. Par conséquent, la charge de rupture de la chaîne utilisée lors de l'accident, soit de 11 204 kg, et celle d'une chaîne neuve de grade 70, soit de 12 000 kg, sont toutes deux dépassées.

Une dernière analyse a été effectuée, cette fois en considérant l'angle de 16,5° et la charge de rupture de la chaîne de 11 204 kg. Par celle-ci, il est démontré que la force minimale appliquée par le treuil pour causer la rupture de la chaîne est de 6364 kg. Ainsi, le treuil a la capacité de provoquer la rupture de la chaîne pour cet angle puisqu'au moment de l'accident, le treuil a une capacité de tir d'environ 8119 kg.

4.2.9 Positionnement du crochet du treuil directement sur un maillon

Le fait de tirer sur une chaîne en s'agrippant directement sur un maillon et non aux extrémités de la chaîne a comme effet d'appliquer des contraintes supplémentaires à certains maillons. Pour cette raison, la charge d'utilisation réelle de la chaîne et du maillon est inconnue. Lorsqu'une tension est appliquée sur un seul maillon, il est impossible d'utiliser la charge d'utilisation fournie par le fabricant puisque celle-ci est obtenue en tension directe répartissant la charge sur l'ensemble des maillons. Cette pratique ne correspond pas à l'utilisation prévue par les fabricants.

Les simulations effectuées dans l'expertise de l'Université Laval démontrent notamment les effets d'un effort de flexion sur le maillon d'une chaîne. Les simulations confirment qu'une force latérale appliquée par le crochet du treuil sur un maillon et correspondant au poids du conteneur maritime augmente les niveaux de contraintes subis par le maillon.

4.2.10 Utilisation sécuritaire des chaînes

La chaîne utilisée lors de l'accident est une chaîne de grade 70 fabriquée par Kinedyne en conformité avec la norme NACM⁶. Sur les étiquettes du contenant du fabricant de cette chaîne, il est indiqué que la chaîne ne peut pas être utilisée pour tirer ou pour lever des charges.

La norme NACM définit l'utilisation des chaînes selon leur grade. Ainsi les chaînes de grade 70 sont conçues pour arrimer les charges et non pour tirer ou pour lever les charges.

⁶ NACM : National Association of Chain Manufacturers

La norme ASME⁷ B30.9, *Slings – Safety standard for Cableways, Cranes, Derricks, Hoists, Hooks, Jacks, and Sling*, spécifie des recommandations d'utilisation qui concernent les chaînes de grade 80 ou 100. À l'article 9-1.3.2, les configurations possibles avec les chaînes sont spécifiées, c'est-à-dire un brin, deux brins, ou plus, lorsqu'elles sont utilisées en tension directe. Il est mentionné que d'autres types de configurations peuvent être utilisés. Dans ces cas, un fabricant ou une personne compétente doit en spécifier les conditions d'utilisation. De plus, dans cette norme, l'utilisation de chaînes pour tirer des charges n'est pas prévue. Il est également mentionné que les surcharges soudaines appliquées sur une chaîne doivent être évitées. Cette instruction est également énoncée par OSHA⁸ dans le document *Sling Safety* et dans la norme CSA⁹ B75-1947, *Code of practice for the use and care of chain*.

4.2.11 Inspection des chaînes

La norme NACM, *Welded steel chain specifications*, énonce à l'article 10 que les chaînes doivent être périodiquement inspectées afin d'y déceler des signes d'usure ou de corrosion, notamment l'élongation d'un maillon, des entailles, des fissures, etc.

Dans le même sens, la norme ASME B30.9, *Slings – Safety standard for Cableways, Cranes, Derricks, Hoists, Hooks, Jacks, and Sling*, spécifie à l'article 9-1.9.5 qu'une chaîne doit être retirée si elle présente, notamment, de la corrosion excessive, des maillons déformés, étirés, etc. Cette norme spécifie également qu'une inspection périodique doit être effectuée, lors de laquelle chaque maillon doit être inspecté afin d'examiner toute sa surface, notamment les endroits où les maillons s'entrecroisent.

Selon cette norme, la fréquence d'inspection dépend de différents facteurs, notamment la fréquence et les conditions d'utilisation ainsi que la nature des activités. Il est indiqué que la chaîne devrait être inspectée minimalement une fois par an. Toutefois, pour une utilisation soutenue, la chaîne devrait être inspectée à tous les mois ou quatre fois par année. Enfin, pour des utilisations particulières, la fréquence doit être établie par une personne qualifiée. Le fait de tirer des charges avec des chaînes peut être considéré comme étant une utilisation spéciale puisqu'aucune norme ou fabricant n'encadre cette pratique.

4.2.12 Méthodes de travail et formation concernant le transport de conteneur chez Remorquage Auclair inc.

Selon les informations et les témoignages recueillis :

Les méthodes de travail pour le remorquage de conteneur sont informelles et ne sont pas écrites. Aucun document formel et écrit n'existe au sein de l'entreprise. Elles varient selon les travailleurs, les équipements disponibles sur les dépanneuses (type et nombre de chaînes), la configuration des dépanneuses et l'état des lieux.

⁷ ASME : American Society of Mechanical Engineers

⁸ OSHA : Occupational Safety and Health Administration

⁹ CSA : Association canadienne de normalisation

Les méthodes de travail utilisées consistent en différentes variantes de l'utilisation des chaînes de transport de grade 70. Les travailleurs effectuent différents assemblages avec une ou des chaînes. Selon le type d'assemblage, ils installent le crochet du treuil directement sur la chaîne ou dans un anneau, afin de tirer le conteneur sur le plateau de la dépanneuse. Le choix des méthodes de travail appartient aux opérateurs de dépanneuse.

Les travailleurs expérimentés sont responsables de la formation des nouveaux travailleurs. Différentes méthodes pour le transport de conteneur maritime sont enseignées par les formateurs.

Le directeur de production recommande une méthode de travail différente de celle qui est conseillée par le superviseur des travailleurs. Ils enseignent deux méthodes différentes.

Lors de la formation par accompagnement, les travailleurs sont informés de la capacité des treuils mais il n'y a pas d'explications concernant la capacité de tir réelle du treuil en fonction du nombre de couches sur le tambour.

Aucune consigne de sécurité concernant l'utilisation sécuritaire des chaînes n'est incluse dans la formation des travailleurs, notamment celles au sujet des charges d'utilisation des chaînes utilisées, des différents grades de chaîne, de l'effet de l'angle de la chaîne sur la tension dans celle-ci (donc sur sa charge d'utilisation réelle) et des risques liés à l'application d'une tension directe sur un maillon de la chaîne.

Il y a absence d'indication dans les méthodes de travail et lors de la formation concernant les vérifications à faire sur les chaînes afin de détecter les éléments qui entraînent leur rejet.

Dans la situation où un conteneur maritime est possiblement coincé dans la glace, la procédure transmise oralement consiste à soulever l'avant de ce conteneur à l'aide du plateau. Si cette manœuvre est réalisée, le travailleur peut alors procéder au chargement avec sa méthode de travail habituelle.

4.2.13 Levage d'un conteneur maritime selon les normes ISO

Les composants et les structures du conteneur maritime impliqué lors de l'accident sont construits selon les normes ISO. La norme ISO 3874, Conteneur maritime de la série 1 – Manutention et fixation, traite spécifiquement du déplacement sécuritaire des conteneurs maritimes de même type que celui impliqué dans l'accident. L'article 6 de cette norme détaille les méthodes de levage des conteneurs maritimes. Dix méthodes de levage y sont décrites, toutefois aucune des méthodes ne prévoit l'utilisation de chaînes et d'une dépanneuse pour en faire le chargement sur le plateau de cette dernière.

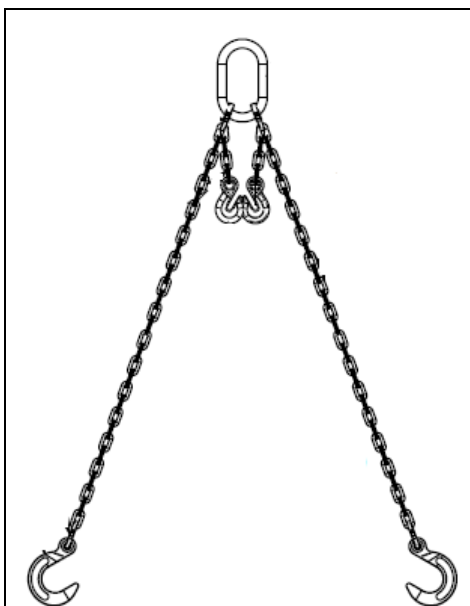
L'article 5.2 de cette norme mentionne la possibilité d'utiliser d'autres méthodes de levage non-spécifiées. Toutefois, il est indiqué que la manutention d'un conteneur maritime, selon des méthodes autres que celles spécifiées à l'article 6, ne doit être effectuée qu'après avoir soigneusement considéré le matériel qui sera utilisé et les méthodes de levage envisagées dans le respect des Normes internationales relatives aux conteneurs maritimes. Ceci implique qu'une personne ayant les compétences et les connaissances nécessaires s'assure de la conformité et de la sécurité de la méthode proposée.

L'article 7.1 de la même norme indique que les conteneurs maritimes ne doivent être ni traînés, ni poussés lorsqu'ils reposent sur une surface quelconque.

4.2.14 Transport spécialisé R.D.C. inc. et équipements attestés à la suite d'un accident similaire

En [...], un travailleur de Transport spécialisé R.D.C. inc. a subi un accident lors du chargement d'un conteneur maritime de 12,2 mètres sur une remorque munie d'un treuil. Une chaîne avait été installée à la base du conteneur maritime par les deux pièces de coin. Le crochet du câble du treuil de la remorque avait été fixé sur cette chaîne. Lorsque le travailleur a actionné le treuil et que le câble a été mis sous tension, la chaîne a cassé et le travailleur a été heurté à la tête par le câble du treuil et le crochet de ce câble. Le travailleur a subi de graves lésions et diverses atteintes permanentes. Il n'est plus en mesure de travailler. Cet accident a fait l'objet d'une enquête de la part de Travail Canada.

Des exigences de Travail Canada ont mené l'employeur à développer deux assemblages de chaînes constitués de différents accessoires et attestés par un ingénieur. L'attestation détaille le montage des accessoires formant l'assemblage et spécifie certaines consignes d'utilisation, notamment l'angle maximal à respecter ainsi que la charge d'utilisation. Les chaînes de l'assemblage sont de grade 100 et elles sont munies de crochets à leurs extrémités. Ces chaînes sont liées par un anneau central formant alors un assemblage en V (croquis 5). Lors de l'utilisation de cet équipement, le crochet du treuil est installé sur l'anneau central. Deux des crochets de l'assemblage peuvent être insérés directement dans les pièces de coin du conteneur maritime. Il n'est plus nécessaire de former une boucle autour d'une pièce de coin.



Croquis 5 – Assemblage de chaînes
(Source : Camtech Consultants inc.)

Bien que Transport spécialisé R.D.C. inc. ait dû mettre en place une méthode de travail sécuritaire impliquant l'utilisation d'un assemblage de chaîne en [...] à la suite d'un accident grave, les travailleurs de Remorquage Auclair inc. n'ont pas été informés et formés quant à l'existence et à l'utilisation de ces équipements. Les équipements ne sont d'ailleurs pas disponibles dans les dépanneuses des travailleurs de Remorquage Auclair inc.

4.2.15 Loi sur la santé et sécurité du travail

Selon l'article 51 de la Loi sur la santé et la sécurité du travail, l'employeur doit prendre les mesures nécessaires pour protéger la santé et assurer la sécurité et l'intégrité physique du travailleur. Il doit notamment :

- s'assurer que l'organisation du travail et les méthodes et techniques utilisées pour l'accomplir sont sécuritaires et ne portent pas atteinte à la santé du travailleur;
- utiliser les méthodes et techniques visant à identifier, contrôler et éliminer les risques pouvant affecter la santé et la sécurité du travailleur;
- fournir un matériel sécuritaire et assurer son maintien en bon état;
- informer adéquatement le travailleur sur les risques reliés à son travail et lui assurer la formation, l'entraînement et la supervision appropriés afin de faire en sorte que le travailleur ait l'habileté et les connaissances requises pour accomplir de façon sécuritaire le travail qui lui est confié.

4.3 Énoncés et analyse des causes

4.3.1 Soumise à des contraintes qui provoquent une surcharge, la chaîne se rompt entraînant ainsi la projection du crochet et du câble du treuil sur le conducteur de dépanneuse.

La force appliquée par le treuil combinée à l'angle que forme la chaîne par rapport au conteneur maritime augmente la tension exercée sur la chaîne. Cette tension est supérieure à la charge de rupture de la chaîne qui, de surcroît, est diminuée par la présence de corrosion.

Lors de l'accident, le treuil peut déployer une force de 8110 kg. Selon l'expertise de l'Université Laval, la force nécessaire pour rompre la chaîne lorsqu'elle est utilisée dans un angle de 16,5°, est de 6364 kg. Puisque le treuil peut déployer 8110 kg, il suffit que le besoin en force atteigne 6364 kg pour rompre la chaîne. Il est démontré que la force appliquée par le treuil est intensifiée par plusieurs éléments lors de l'accident. En effet, au moment de tirer le conteneur, les forces présentes sont la masse du conteneur maritime à laquelle il faut ajouter un coefficient de friction en raison des conditions environnementales et de la conception même du conteneur maritime, notamment la présence des traverses de plancher sous celui-ci. Le treuil doit également déployer une force additionnelle afin de glisser le conteneur maritime sur le plateau incliné. Ceci signifie que la configuration qui est en place au moment de l'accident permet au treuil de rompre la chaîne.

De plus, la prise du crochet fermé directement sur un des maillons de la chaîne produit un effort de flexion sur celui-ci provoquant l'augmentation de contraintes qui contribuent à sa rupture.

Ainsi, l'effet combiné de la surcharge de la chaîne et des contraintes créées par l'effort de flexion imposé par le crochet fermé sur le maillon, entraîne sa rupture. La rupture du maillon provoque le relâchement de la tension dans la chaîne sur laquelle le crochet et le câble d'acier du treuil reposent. Le crochet et le câble d'acier sont donc projetés sur le conducteur de dépanneuse qui se trouve dans leur trajectoire, soit près du plateau en avant du boîtier de contrôle.

Cette cause est retenue.

4.3.2 Des lacunes dans la gestion de la santé et de la sécurité lors des manœuvres de chargement d'un conteneur maritime entraînent l'utilisation d'une méthode de travail inadéquate qui permet la surcharge de la chaîne.

Considérant la survenue d'un accident similaire en [...] à un travailleur de Transport spécialisé R.D.C. inc. et l'étroite collaboration entre cette entreprise et Remorquage Auclair inc., l'employeur n'ignorait pas les risques liés au chargement d'un conteneur maritime. Effectivement, à la suite de cet accident, Transport spécialisé R.D.C. inc. a dû concevoir des équipements attestés par un ingénieur ainsi qu'une méthode de travail sécuritaire afin de pouvoir effectuer le chargement de conteneur maritime sur un plateau de dépanneuse.

Malgré le développement des assemblages de chaînes de grade 100 en [...], aucune mise à jour ou analyse des méthodes de travail véhiculées auprès des travailleurs de Remorquage Auclair inc. n'a été effectuée. Aucune procédure ou directive de travail sécuritaire n'a été élaborée pour éliminer ou contrôler les risques liés au chargement d'un conteneur maritime et à l'utilisation des chaînes de grade 70. Aucune formation n'a été offerte aux travailleurs de Remorquage Auclair inc. à ce sujet et aucun suivi concernant les méthodes de travail utilisées n'a été effectué.

En l'absence de directives et de méthodes de travail définies par l'employeur, le conducteur de dépanneuse applique la méthode transmise lors de son jumelage. Les équipements utilisés sont ceux disponibles sur la dépanneuse au moment de l'accident, notamment une chaîne de grade 70 dont l'usage recommandé est strictement l'arrimage de charges sur un camion. Toutefois, cette information est absente de la formation que l'employeur offre à ses travailleurs. Les conséquences de l'angle de la chaîne sur la tension exercée sur celle-ci de même que les risques de surcharge sont également absents de la formation des travailleurs.

De plus, lors de l'accident, la méthode de travail utilisée pour le chargement du conteneur maritime prévoit le positionnement du crochet du treuil et du crochet fermé directement sur les maillons de la chaîne, et ce, malgré les risques de surcharge sur la chaîne. Les risques liés à cette pratique sont inconnus des travailleurs.

L'information concernant l'utilisation sécuritaire des chaînes, leur inspection et les effets d'une variation du coefficient de friction (résistance au sol ou blocage) sur la tension de la chaîne utilisée n'est pas transmise aux travailleurs, et ce, bien que cet aspect ait été traité en 2014 par l'employeur et que la documentation soit disponible.

La seule indication donnée quant au chargement d'un conteneur maritime possiblement figé au sol par de la glace est de soulever l'avant de celui-ci avec le plateau. Rien concernant les éléments à observer, notamment la présence de glace autour, sur les quatre coins et sous le conteneur maritime. Ces indications auraient permis au conducteur de dépanneuse de refuser le transport dans ces conditions ou d'envisager l'utilisation d'une autre méthode de travail.

L'inspection des équipements présents sur la dépanneuse est prévue dans la vérification avant départ générale. Toutefois, il n'y a pas d'indications précises sur les éléments à observer sur les chaînes, tels que des signes de corrosion ou de déformation, qui

entraîneraient la non-utilisation des chaînes. Ces informations ne sont pas prévues dans la formation.

Aucun suivi ni supervision n'est effectué par l'employeur afin de s'assurer que les travailleurs de Remorquage Auclair inc. utilisent des méthodes de travail sécuritaires lorsqu'ils effectuent les manœuvres de chargement d'un conteneur maritime.

L'absence de méthode de travail sécuritaire pour le chargement d'un conteneur maritime et l'absence de formation alors que les risques sont connus par l'employeur démontrent les lacunes dans sa gestion de la santé et de la sécurité du travail lors des manœuvres de chargement d'un conteneur maritime sur le plateau d'une dépanneuse.

Cette cause est retenue.

SECTION 5**5 CONCLUSION****5.1 Causes de l'accident**

- Soumise à des contraintes qui provoquent une surcharge, la chaîne se rompt entraînant ainsi la projection du crochet et du câble du treuil sur le conducteur de dépanneuse
- Des lacunes dans la gestion de la santé et de la sécurité lors des manœuvres de chargement d'un conteneur maritime entraînent l'utilisation d'une méthode de travail inadéquate qui permet la surcharge de la chaîne

5.2 Autres documents émis lors de l'enquête

À la suite de l'accident, la CNESST interdit le déplacement du conteneur maritime impliqué dans l'accident (RAP1063239) ainsi que la méthode de travail consistant à utiliser des chaînes et un treuil pour tirer un conteneur maritime sur le plateau d'un camion (RAP1065551).

Le 24 mars 2016, le déplacement du conteneur maritime impliqué dans l'accident est autorisé en raison de l'utilisation d'un appareil de levage adéquat (RAP1054572).

Le 24 janvier 2017, le transport d'un conteneur maritime à l'aide d'une dépanneuse est autorisé. Un équipement est conçu et attesté par un ingénieur, une méthode de travail sécuritaire est élaborée et les travailleurs sont formés sur cette méthode (RAP1102387).

5.3 Recommandations

Afin de sensibiliser les milieux de travail, la CNESST transmettra les conclusions de ce rapport à l'Association des professionnels du dépannage du Québec afin que leurs membres en soient informés.

De plus, dans le cadre de son partenariat avec la CNESST visant l'intégration de la santé et de la sécurité au travail dans la formation professionnelle et technique, le ministère de l'Éducation et de l'Enseignement supérieur diffusera, à titre informatif et à des fins pédagogiques, le rapport d'enquête dans les établissements qui offrent les programmes de formation liés au transport.

ANNEXE A

Accidenté

ACCIDENTÉ

Nom, prénom : **Monsieur [F]**

Sexe : Masculin

Âge : [...]

Fonction habituelle : [...]

Fonction lors de l'accident : Conducteur de dépanneuse

Expérience dans cette fonction : [...]

Ancienneté chez l'employeur : [...]

Syndicat : [...]

ANNEXE B

Liste des personnes et témoins rencontrés

Remorquage Auclair inc. :

- Monsieur [G], [...]
- Monsieur [H], [...]
- Monsieur [I], [...]
- Monsieur [J], [...]
- Monsieur [K], [...]
- Monsieur [F], conducteur de dépanneuse
- Madame [A], [...]
- Monsieur [L], [...]
- Monsieur [M], [...]

Transport spécialisé R.D.C. inc. :

- Monsieur [C], [...]
- Monsieur [N], [...]
- Monsieur [B], [...]
- Monsieur [D], [...]

Association professionnelle du dépannage du Québec :

- Monsieur [O], [...]
- Monsieur [P], [...]

Centre de formation en transport de Charlesbourg :

- Monsieur Francis Gingras, professeur
- Monsieur Sylvain Labrie, conseiller pédagogique

Centre intégré universitaire de santé et services sociaux de la Capitale-Nationale :

- Monsieur Benoît Dufour, employé de maintenance

Les Constructions Pierre Blouin :

- Monsieur [Q], [...]

Service de police de la Ville de Québec :

- Madame Geneviève Audet, enquêteuse
- Madame Josée Boutet, enquêteuse
- Madame Jessie Boulet-Duval, constable
- Monsieur Vincent Germain, constable
- Monsieur Maxime Lachance, constable
- Madame Sarah-Émilie Lefebvre, constable

Hercules SLR Inc. :

- Monsieur [R], [...]

Camtech consultants inc.

- Monsieur [S], [...]

ANNEXE C

Rapport d'expertise du Centre de métallurgie du Québec

Bris d'une chaîne de camion lors du chargement d'un conteneur

Rapport rédigé pour

Mme Stéphanie Deschamps
Mme Alexandra Miranda-Chang
Inspectrices

CNESST
425, rue du Pont
Québec, Qc
G1K 7S6

No de contrat CNESST : DA 678688
No projet CMQ : 721-15-115

Préparé par

Luc Lafrenière, ing.
Patrick Gosselin, techn.

Le 26 mai 2016

Sommaire

À la lumière des observations et analyses en laboratoire, nous avons déterminé que le bris de la chaîne du camion a été occasionné par un effet de flexion latérale sur la chaîne, et ce, jumelé à la traction d'une charge supérieure à la capacité de la chaîne.

De plus, nous avons aussi déterminé que la chaîne brisée était une chaîne destinée au transport de marchandises et non pas au chargement de marchandises.

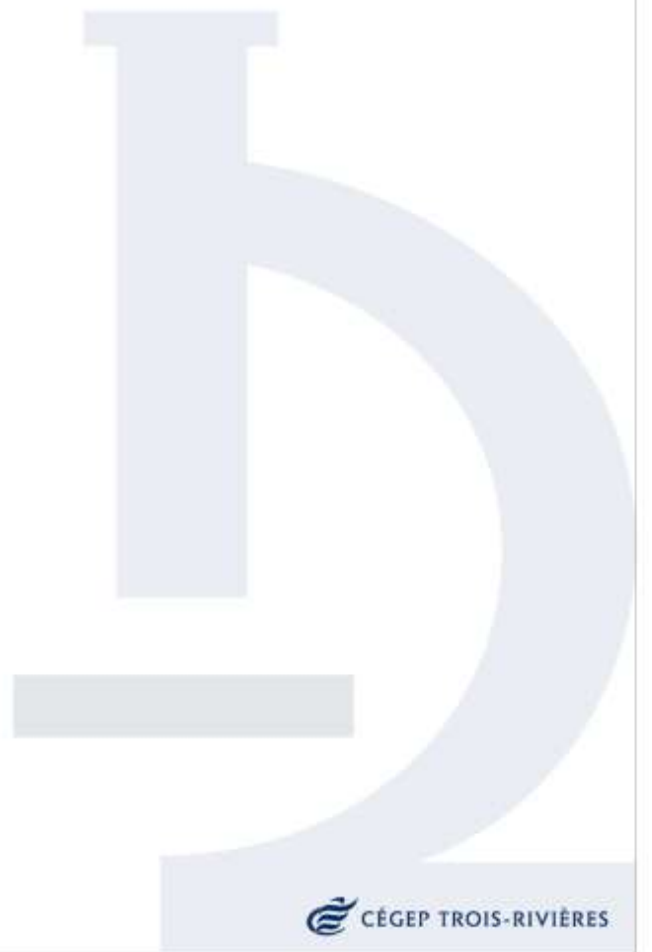


Table des matières

1. Mise en situation.....	2
2. Méthodologie	3
3. Résultats	3
3.1 Les essais de traction sur deux chaînes.....	3
3.2 Les mesures de dureté de maillons usagé et neuf.....	5
3.3 L'examen visuel de la chaîne et du maillon brisé	6
4. Discussion	11
5. Conclusion.....	11

1 Mise en situation

La CNESST requiert les services d'expertise du Centre de Métallurgie du Québec afin d'identifier la cause à l'origine du bris d'une chaîne de grade 70 ayant servi à tirer un conteneur sur la remorque d'un camion (photo 1). Selon la CNESST, le fournisseur de la chaîne serait la compagnie Kenedyne. L'accident est survenu le 1 mars 2016. Selon la CNESST, le conteneur de 5000 lbs était vide au moment de la tentative de chargement. Nous ignorons depuis combien de temps la chaîne était en service.



Photo 1. La benne de camion apparaît en rouge et le conteneur en jaune.

2 Méthodologie

Trois différentes techniques d'analyse furent utilisées pour identifier la cause à l'origine du bris, soit : des essais de résistance en traction, des essais de dureté et un examen visuel détaillé.

3 Résultats

3.1 Les essais de traction sur deux chaînes

Deux essais de traction furent demandés par la CNESST : le premier sur la chaîne brisée lors de l'incident du 1 mars et le second sur une chaîne de grade similaire à titre comparatif (photo 2). En fait, ce sont deux sections de sept maillons qui furent évalués pour leur résistance ultime en traction.



Photo 2. Les maillons de la chaîne brisée 2,0" long X 1,37" large et 0,375" Ø, alors que la chaîne neuve avait 2,1" long X 1,30" large et 0,400" Ø. L'un des maillons de la chaîne neuve portait le code BU7. Les deux sections de chaîne furent fournies par la CNESST.

Les résultats ont démontré une différence de près de 20% de résistance ultime (en lbs) entre les deux chaînes. Un examen dimensionnel a révélé que les maillons de la chaîne brisée étaient moins gros que ceux de la chaîne neuve (Tableau 1), mais nous ignorons si cette différence a été occasionnée par la rouille avec le temps ou encore s'il s'agit des dimensions initiales réelles de la chaîne brisée.

	Diamètre d'un maillon (pouce)	Résistance ultime (livres)	Résistance ultime (psi)
Chaîne brisée	0,375	24 700	112 000
Chaîne neuve	0,400	30 300	123 000

Tableau 1. Comparaison de la résistance entre la chaîne brisée et une neuve.

Une recherche sur le Web a permis de trouver qu'une chaîne neuve de grade 70 ayant 0,375" de diamètre possède une résistance ultime de 26 400 lbs (schéma 1), ce qui est 6 % supérieure à la résistance de la chaîne usagée qui s'est brisée en service.

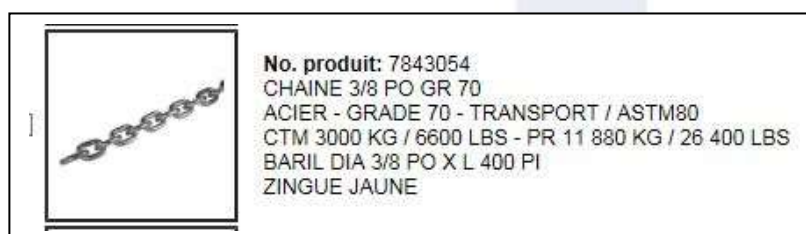


Schéma 1. Informations de la compagnie Faucher obtenues sur le Web.

De plus, notre recherche sur les sites des compagnies Ben-Mor et Kenedyne a révélé qu'une chaîne de grade 70 sert normalement à l'immobilisation de marchandises lors de transport (schéma 2), et non pas à être utilisée comme chaîne de traction ou de chargement.

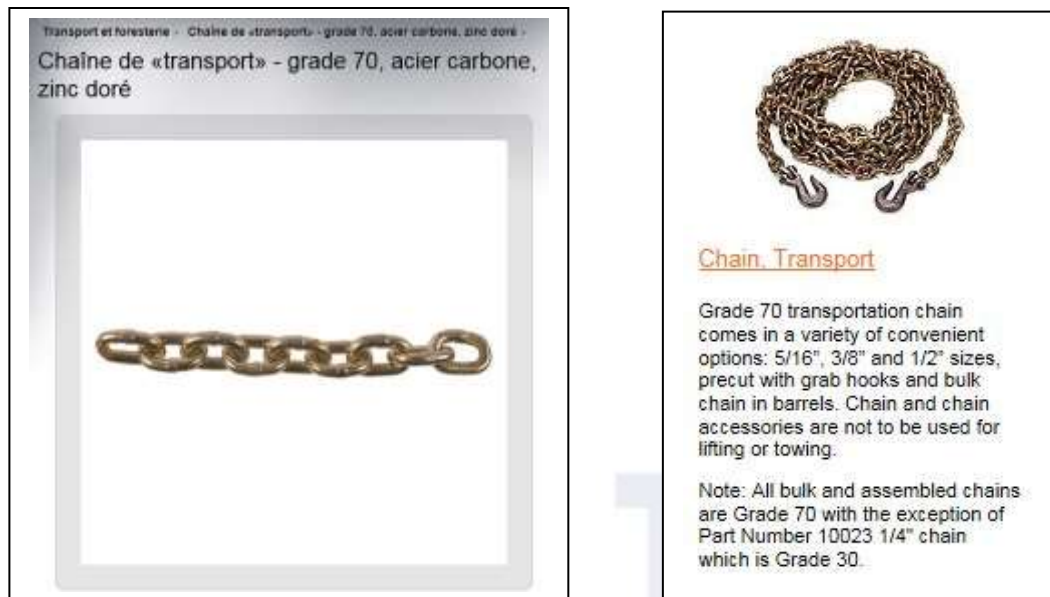


Schéma 2. Information de la compagnie Ben-Mor obtenue sur le Web et de la compagnie Kenedyne obtenue de la CNESST.

3.2 Les mesures de dureté de maillons usagé et neuf

Des essais de dureté effectués sur un maillon de la chaîne brisée et sur un maillon de la chaîne neuve ont fourni des résultats plus élevés pour la chaîne neuve en lien avec la composition chimique des deux aciers ou avec leur traitement thermique subi.

Chaîne usagée = 36 HRC

Chaîne neuve = 44 HRC

3.3 L'examen visuel de la chaîne et du maillon brisé

L'examen visuel a permis d'obtenir six informations importantes, soit :

- 1) Les maillons de la chaîne brisée ne portaient aucune identification, mais le crochet à l'une des extrémités de la chaîne possédait les informations relatives à la chaîne (photos 3).



Photos 3. Le crochet porte la mention de fabrication chinoise et celle de grade 70 pour la chaîne.

- 2) Le bris de la chaîne usagé n'est pas survenu dans le joint soudé du maillon (photo 4).

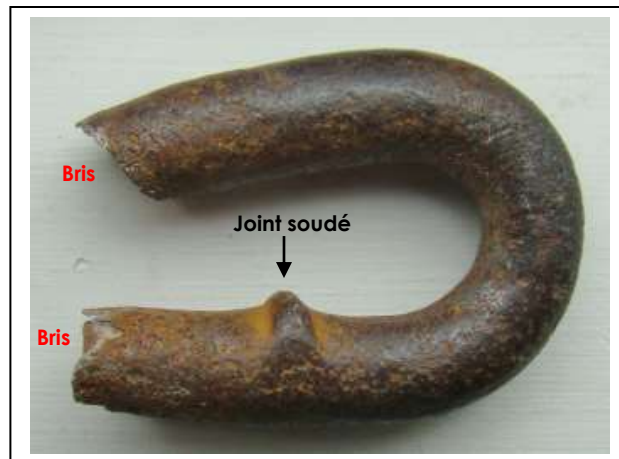


Photo 4. Maillon brisé de la chaîne usagée G70.

- 3) Le maillon brisé présentait deux surfaces de rupture différentes, soit une surface à angle de 45° et la seconde à angle de 90° (photo 5).

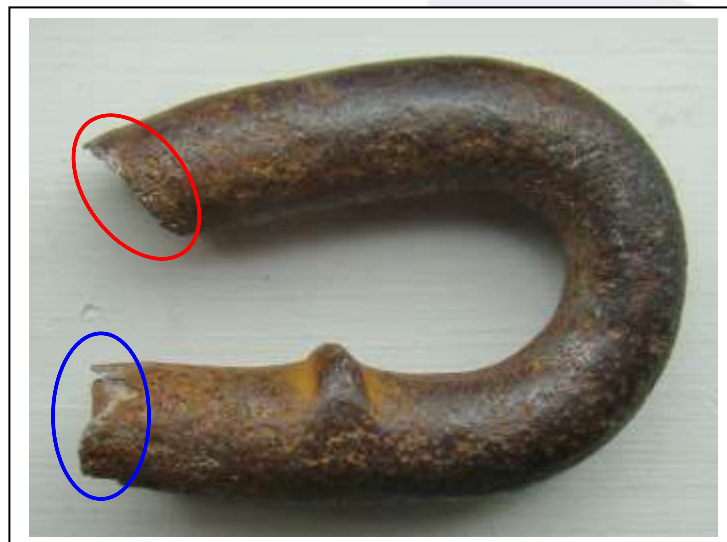


Photo 5. Surface brisée à angle de 45° (cercle rouge) et surface brisée à angle de 90° (cercle bleu).

En examinant chacune des surfaces de rupture, nous pouvons y trouver des informations révélant les mécanismes par lesquels sont survenus les bris, soit :

- Les deux bris présentent de la striction (photo 6), c'est-à-dire une réduction de section qui témoigne d'un effet d'étirement lent sous une surcharge.

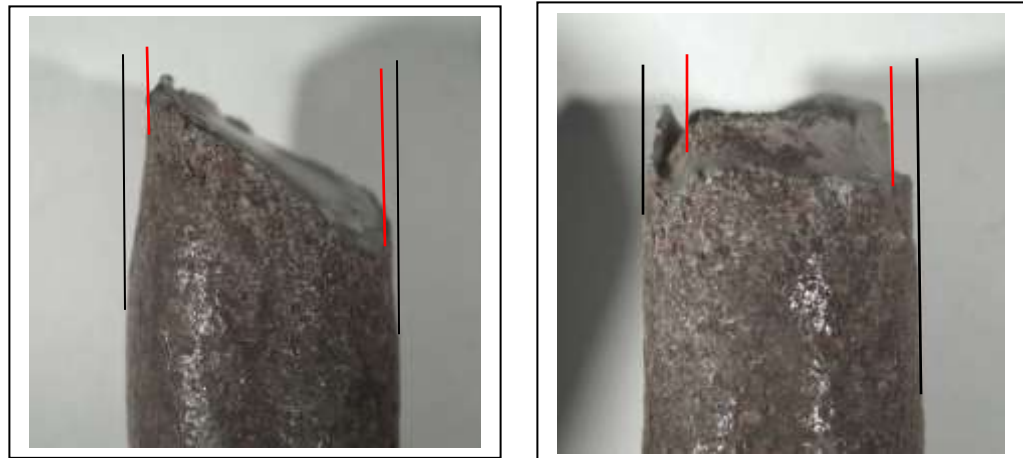


Photo 6. Réduction de section par striction des deux extrémités du maillon brisé, indice de l'application d'une surcharge en traction.

- Le bris à angle de 45° avec surface lisse se crée lorsque des forces excessives de traction et de flexion agissent simultanément en un même endroit (photo 7), alors que le bris à angle de 90° se produit sous l'effet d'une force de traction unidirectionnelle excessive.

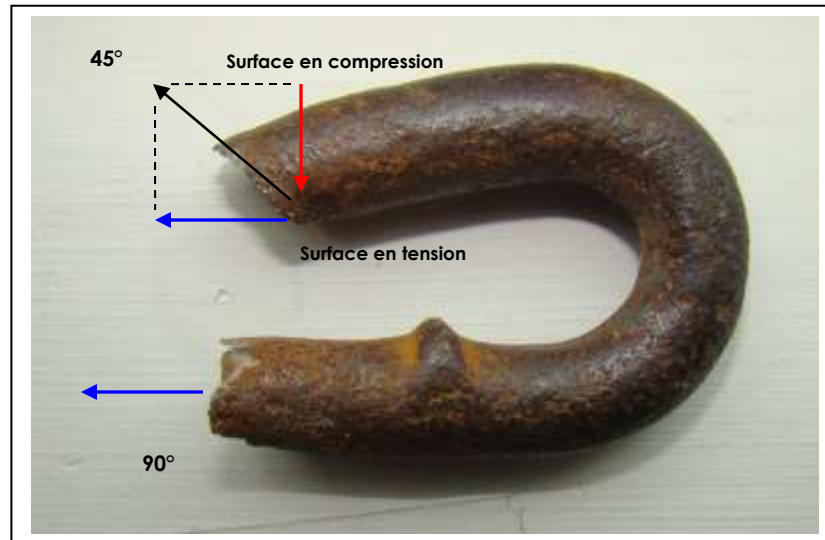


Photo 7. Orientations des forces de traction (flèches bleues) et de flexion (flèche rouge). La force de flexion fut créée par la pression du crochet placé sur la chaîne.

- 4) La présence de déchirures en V sur la surface latérale du maillon brisé dans la zone d'amorce du bris (photo 8), témoigne d'un effet de surcharge jumelé à un effet de flexion localisé. Cette association peut s'expliquer par la présence d'un crochet, c'est-à-dire une traction latérale exercée par un crochet sur la chaîne jumelé à un étirement excessif de celle-ci.

De plus, le déchirement de l'acier a été facilité par les dommages causés par la corrosion des maillons de la chaîne (photo 9).

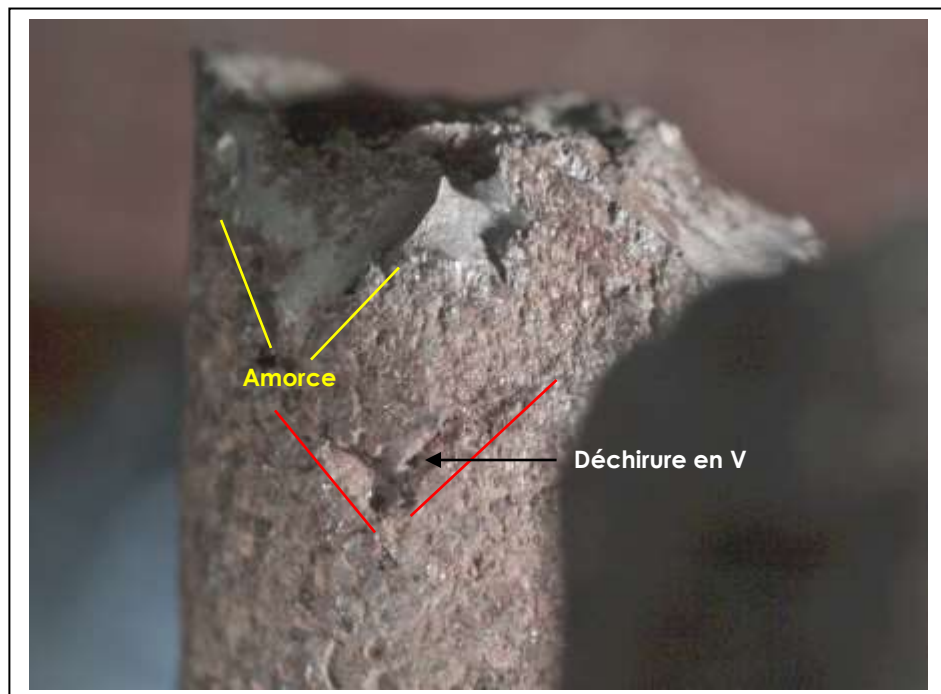


Photo 8. Déchirement par flexion de la surface du maillon brisé (10X).



Photo 9. Surface du maillon brisé très endommagé par la corrosion (12X).

4 Discussion

Considérant que le profil des surfaces de rupture témoignent de la synergie de trois facteurs importants, soit :

- 1) de l'effet jumelé de forces de traction et de flexion;
- 2) de l'effet marqué d'une surcharge sur la chaîne;
- 3) de la détérioration de la chaîne par la corrosion;

nous sommes d'avis que trois éléments peuvent avoir été à l'origine du bris de la chaîne, soit :

- 1) la méthode d'attache de la chaîne qui a possiblement été inadéquate, ce qui expliquerait le bris en flexion de la chaîne;
- 2) le conteneur qui devait être emprisonné dans la glace, ce qui a possiblement été à l'origine de la surcharge;
- 3) l'âge de la chaîne était en service depuis très longtemps et qui ne possédait plus la résistance physique attendue à cause de sa détérioration par la corrosion.

5 Conclusion

Considérant les éléments énumérés en Discussion, nous sommes d'avis que trois facteurs sont à l'origine du bris de la chaîne en service, soit un effet de flexion par traction latérale d'un crochet, la traction d'une charge supérieure à la capacité de la chaîne, et la détérioration de surface de la chaîne par la corrosion.

Processus d'amélioration continue

Nous souhaitons ardemment avoir répondu à l'ensemble de vos besoins. Ainsi, dans le cadre de notre processus d'amélioration continue ISO 9001 : 2008, nous sommes disposés à recevoir vos commentaires de manière à améliorer nos prochaines interventions.

Luc Lafrenière, ing.



ANNEXE D

Rapport d'expertise de l'Université Laval

Analyse des conditions de chargement d'une chaîne utilisée lors de la manutention d'un conteneur maritime et analyse de méthodes de tirage d'un conteneur sur une plateforme de remorqueuse

Expertise réalisée pour Madame Stéphanie Deschamps, Inspectrice
Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST)

par

Jean Ruel, ing., Ph.D.

Professeur

Directeur du département de génie mécanique de l'Université Laval
Directeur du bureau de design et de l'atelier de fabrication mécanique

22 septembre 2016

Introduction

Ce rapport est la réalisation d'un mandat qui m'a été confié le 19 mai 2016 par la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST).

Le 1^{er} mars 2016, un accident est survenu lors de la tentative de manutention d'un conteneur maritime dans le but de le faire monter sur la plate-forme d'un camion de remorquage en le tirant à l'aide du treuil du camion.

Les circonstances de l'accident ont été documentées par Mesdames Stéphanie Deschamps et Alexandra Miranda-Chang, inspectrices à la CNESST. Elles m'ont fourni un dossier très complet le 26 mai 2016.

Les éléments à réaliser dans le cadre de ce mandat étaient :

1. Déterminer la charge maximale admissible sur la chaîne utilisée lors de l'accident en fonction de son positionnement sur le conteneur et de son utilisation;
2. Déterminer la charge maximale admissible sur une chaîne neuve identique;
3. Évaluer les efforts potentiels sur la chaîne utilisée lors de l'accident compte tenu des conditions et des circonstances;
4. Donner des avis techniques sur les quatre méthodes de travail utilisées par les travailleurs de l'entreprise lors de l'embarquement d'un conteneur sur une plate-forme de remorqueuse.

Ce rapport répond aux points énumérés ci-dessus.

Chapitre 1

Évaluation des efforts et de la charge maximale admissible sur la chaîne

La chaîne utilisée lors de l'accident est une chaîne commerciale destinée au transport, pour la fixation et le maintien de la charge sur un véhicule.

Elle est de grade 70 et d'une dimension nominale de 3/8". Une photo d'une chaîne neuve similaire est présentée à la figure 1. La longueur de la chaîne excluant les crochets est de 10 pieds. Elle est munie de deux crochets : un crochet dit « ouvert » (extrémité supérieure droite sur la photo) et un crochet dit « fermé » (extrémité inférieure droite).

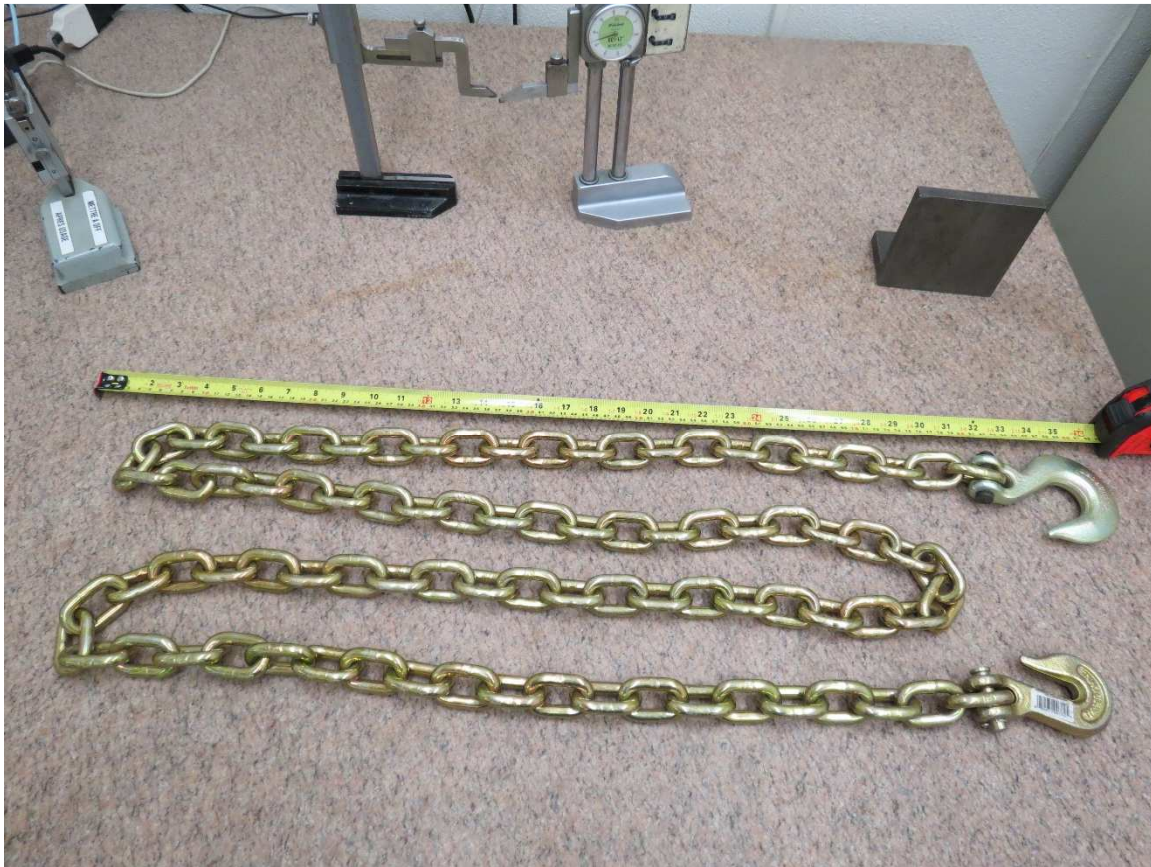


Figure 1. Chaîne neuve similaire à celle utilisée lors de l'accident.

Normes

La norme NACM (National Association of Chain Manufacturers) intitulée « Welded steel chain specifications », réf. [1], mentionne les éléments suivants :

- la chaîne de grade 70 est en acier au carbone, on la désigne « chaîne de transport » mais elle est destinée uniquement à l'arrimage d'une charge en vue de son transport et non à son levage ou à sa traction;
- la sélection de l'acier constituant la chaîne est laissée à la discrétion du fabricant de chaîne. Par contre, pour une chaîne de grade 70 en acier au carbone, la composition ne doit pas contenir de plus grandes proportions que : 0.35% pour le carbone, 0.04% pour le phosphore et 0.05% pour le soufre;
- les chaînes des grades supérieurs (grades 80 et 100) sont constituées d'aciers alliés. Ces chaînes peuvent être utilisées pour le levage ou la traction d'une charge. La norme mentionne que pour les opérations de levage, seules des chaînes en acier allié devraient être utilisées;
- on retrouve au tableau III de la page 8 de cette norme des données de charges admissibles pour les chaînes de grade 70, pour différentes dimensions nominales;
- pour la chaîne de dimension nominale de 3/8", la charge limite de travail (working load limit) est de 6600 lbs (3000 kg), tandis que la charge de rupture (minimum breaking force) est de 26 400 lbs (12 000 kg).

Les crochets qui sont fixés aux chaînes comportent également un grade harmonisé à celui de la chaîne, et inscrit à la forge sur le côté du crochet.

La norme NACM intitulée « Forged grade 30, grade 43, and grade 70 chain hook specifications », réf. [2], mentionne qu'un crochet assorti à une chaîne présente les mêmes limites de chargement. Par exemple, un crochet identifié 3/8" grade 70 présente une charge limite de travail (Working load limit) de 6600 lbs (3000 kg).

Fabricant

Le fabricant de la chaîne utilisée lors de l'accident est Kinedyne¹.

Sur le site internet de ce fabricant, il est clairement indiqué que la chaîne de grade 70 ne doit pas être utilisée pour soulever ou tirer une charge. Cette indication est également présente en lettre majuscules sur les contenants de chaîne de grade 70 de ce fabricant.

Types d'aciers et propriétés

Selon les restrictions de la norme NACM (réf. [1]) concernant la composition des aciers au carbone pouvant être utilisés pour fabriquer une chaîne de grade 70, à savoir des valeurs limites de 0.35% pour le carbone, de 0.04% pour le phosphore et de 0.05% pour le soufre, il est possible d'identifier la nuance AISI-SAE 1035 (réf. [3], page 407) comme étant l'acier limite répondant à ce critère. Les aciers à plus haute teneur en carbone ne correspondent plus à ce critère de la norme.

¹ www.kinedyne.com

En plus du carbone, le soufre et le phosphore comportent également des valeurs limites car ces constituants rendent l'acier plus fragile et plus difficile à souder (réf. [4], page 293). En ce qui concerne le carbone, une augmentation de sa concentration améliore sa résistance mécanique (réf. [4], page 294), mais elle diminue aussi sa soudabilité.

L'acier 1035 constitue donc une nuance limite pour la fabrication de chaîne respectant la norme NACM pour le grade 70.

Les propriétés mécaniques des différents types d'acier que l'on retrouve dans les références comportent des plages de valeurs possibles qui sont généralement assez larges. Par exemple, la réf. [3] propose, pour l'acier SAE 1025, une limite élastique pouvant varier de 40 000 à 90 000 psi (276 à 621 MPa) et une limite ultime de 60 000 à 103 000 psi (414 à 711 MPa). Pour l'acier SAE 1045, cette même référence propose une limite élastique pouvant varier de 50 000 à 162 000 psi (345 à 1118 MPa) et une limite ultime de 80 000 à 182 000 psi (552 à 1256 MPa).

La réf. [6] rapporte des résultats d'essais de traction pour différents aciers. Par exemple, pour l'acier SAE 1018, on retrouve une limite élastique de 32 000 psi (220 MPa) et une limite ultime de 50 000 psi (341 MPa).

Rapport d'expertise du Centre de métallurgie du Québec

La CNESST a mandaté le Centre de métallurgie du Québec pour réaliser des essais mécaniques et l'observation de deux chaînes : celle utilisée lors de l'accident, ainsi qu'une chaîne neuve identique. Une copie du rapport d'expertise a été mise à ma disposition, réf. [5].

On y rapporte des valeurs de limite ultime de 112 000 psi pour la chaîne utilisée lors de l'accident, et de 123 000 psi pour une chaîne neuve de grade 70 identique. On peut remarquer que ces deux valeurs se situent entre les valeurs maximales proposées par la réf. [3] pour l'acier SAE 1025 (90 000 psi) et l'acier SAE 1045 (162 000 psi). On peut donc vraisemblablement supposer que la nuance d'acier utilisée pour la fabrication de ces deux chaînes s'apparente effectivement à l'acier SAE 1035.

Les résultats du rapport d'expertise du Centre de métallurgie du Québec semblent donc en accord avec ce que prescrit la norme NACM (réf. [1]) en ce qui concerne la limite ultime des types d'acier pouvant être employés pour fabriquer les chaînes de grade 70.

D'autre part, on retrouve dans ce rapport les résultats d'essais de dureté des deux chaînes. Les résultats de ces essais sont que la dureté de la chaîne utilisée lors de l'accident était de 36 HRC tandis que celle de la chaîne neuve était de 44 HRC. Le rapport mentionne que « des essais de dureté effectués sur un maillon de la chaîne brisée et sur un maillon de la chaîne neuve ont fourni des résultats plus élevés pour la chaîne neuve en lien avec la composition chimique des deux aciers ou avec leur traitement subi ». Cependant, le rapport d'expertise du Centre de métallurgie du Québec ne comporte aucune information quant à la nature des aciers des deux chaînes.

Calcul de la charge maximale admissible sur la chaîne utilisée lors de l'accident

Le terme « charge maximale admissible » est utilisé par la CNESST dans la description du présent mandat. Dans ce qui suit, il sera considéré que ce terme réfère à la charge de rupture, ce qui dans la documentation et les normes concernant les chaînes est nommé « minimum breaking force »,

ceci correspondant également à la « limite ultime ». Il ne s'agit pas de la charge limite de travail (working load limit), qui est beaucoup plus faible.

La référence [6], intitulée « Understanding the difference between chain grades and how they're used », stipule que le grade d'une chaîne correspond à la limite ultime en MPa divisée par 10. Selon ce principe, une chaîne de grade 70 devrait présenter une limite ultime de 700 MPa, ce qui correspond à 101 579 psi.

La chaîne utilisée lors de l'accident présente un diamètre des tiges constituant les maillons de 9.53-9.78 mm, soit 0.375-0.385". Au diamètre minimal (9.53 mm) correspond une section pour les deux côtés (les deux segments rectilignes) d'un maillon de 142.66 mm², soit 0.2209 in².

Multipliant la limite ultime de 700 MPa par cette section, on obtient la force maximale qui peut être appliquée sans causer la rupture du maillon, soit 99 862 N (10 180 kg, 22 395 lbs).

Cette valeur calculée est inférieure à la limite donnée par le fabricant, qui est de 26 400 lbs. Cependant, l'établissement de la limite ultime en fonction d'une donnée unique et arrondie, c'est-à-dire le grade de la chaîne, comporte une certaine plage d'incertitude.

Également, il est important d'utiliser ces valeurs avec prudence car il s'agit de la force qui causerait la rupture des tiges du maillon en traction pure. Or, les parties courbes du maillon (les deux extrémités hémi-toroïdales) sont sollicitées par un chargement plus complexe qu'une traction pure. Il s'agit d'une combinaison de traction et de flexion, et ces efforts combinés peuvent entraîner la rupture à une charge moindre.

La chaîne utilisée lors de l'accident était rouillée et la corrosion a entraîné une diminution de son diamètre, donc de sa charge maximale admissible. En effet, une chaîne neuve présente plutôt un diamètre de 0.400", et à ce diamètre correspond une force maximale calculée de 113 621 N (25 481 lbs), valeur encore inférieure mais plus rapprochée de la limite donnée par le fabricant (26 400 lbs).

Les résultats des essais effectués par le Centre de métallurgie du Québec rapportent une résistance ultime de 24 700 lbs pour la chaîne utilisée lors de l'accident, valeur encore une fois inférieure à la limite de 26 400 lbs donnée par le fabricant.

La charge maximale admissible de la chaîne utilisée lors de l'accident était donc inférieure à la limite de 26 400 lbs annoncée par le fabricant :

- inférieure de 15 % à la limite annoncée si elle est calculée avec une limite ultime de 700 MPa (22 395 lbs vs 26 400 lbs);
- inférieure de 6.4 % à la limite annoncée si on compare la valeur obtenue lors des essais effectués par le Centre de métallurgie du Québec (24 700 lbs vs 26 400).

Charge maximale admissible sur une chaîne neuve identique à la chaîne utilisée lors de l'accident

Une chaîne neuve identique à la chaîne utilisée lors de l'accident m'a été fournie. Elle présente un diamètre des tiges constituant les maillons de 10.16 mm, soit 0.400", tel qu'annoncé par le fabricant. À ce diamètre correspond une section pour les deux côtés (les deux tiges) d'un maillon de 162.15 mm², soit 0.2513 in².

Reprenant le même raisonnement que celui présenté ci-dessus et multipliant la limite ultime de 700 MPa par cette section, on obtient la force maximale qui peut être appliquée sans briser un maillon, soit de 113 505 N (11570 kg, 25 455 lbs).

Cette valeur est légèrement inférieure à la limite donnée par le fabricant, qui est de 26 400 lbs. Compte tenu de la plage d'incertitude mentionnée plus tôt entre la correspondance entre le grade et la valeur exacte de la limite ultime, cette légère différence n'est pas anormale. De plus, il est possible et même probable que le fabricant utilise une nuance d'acier excédant les propriétés minimales requises par le grade. D'ailleurs, les résultats des essais effectués par le Centre de métallurgie du Québec rapportent une résistance ultime de 30 300 lbs pour cette chaîne neuve identique à la chaîne utilisée lors de l'accident, valeur supérieure à la limite de 26 400 lbs donnée par le fabricant.

La charge maximale admissible de la chaîne neuve identique à la chaîne utilisée lors de l'accident est donc :

- inférieure de 3.6 % à la limite de 26 400 lbs annoncée si elle est calculée avec une limite ultime de 700 MPa (25 455 lbs vs 26 400 lbs);
- supérieure de 14.8 % à la limite annoncée si on compare la valeur obtenue lors des essais effectués par le Centre de métallurgie du Québec (30 300 lbs vs 26 400).

En comparant les valeurs obtenues pour la chaîne utilisée lors de l'accident (qui présente une usure apparente, notamment de la corrosion) et celles obtenues pour une chaîne neuve, on constate que l'usure peut diminuer significativement la résistance d'une chaîne et que celle-ci peut même se retrouver en dessous de la limite annoncée par le fabricant pour une chaîne neuve.

Charge résultante sur la chaîne en fonction de l'agencement géométrique de celle-ci avec conteneur et le câble du treuil

Les figures 2 et 3 m'ont été transmises par la CNESST. La figure 2 présente une photo du conteneur après l'accident, avec la chaîne repositionnée afin d'illustrer la configuration lors de l'accident. La figure 3 est un croquis reproduisant une vue en plan de la scène de l'accident.



Figure 2. Photo du conteneur après l'accident, avec la chaîne repositionnée afin d'illustrer la configuration lors de l'accident (source : CNESST).

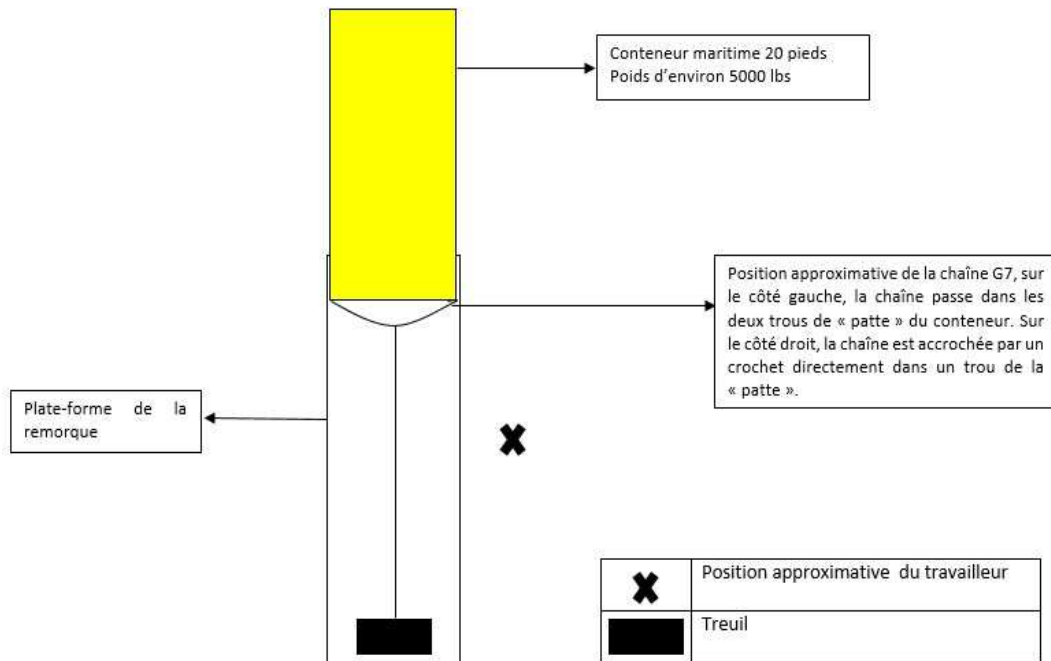


Figure 3. Croquis reproduisant une vue en plan de la scène de l'accident (source : CNESST).

La figure 4 présente un diagramme définissant les paramètres qui permettent d'analyser les forces en présence. La chaîne relie les deux blocs de coins du conteneur. Au centre de cette chaîne se trouve le crochet du treuil qui tire la charge, grâce à un câble. Dépendamment de la longueur de la chaîne, celle-ci présentera un angle α plus ou moins grand par rapport à la base du conteneur. Plus la chaîne est courte, plus l'angle α est faible.

La tension dans la chaîne résultant de l'application d'une force F par le câble du treuil sera d'autant plus grande que sera faible l'angle entre la chaîne et la base du conteneur. Notant T la tension dans la chaîne, l'équilibre des forces est :

$$F = 2 T \sin \alpha$$

ou encore

$$T = F / (2 \sin \alpha)$$

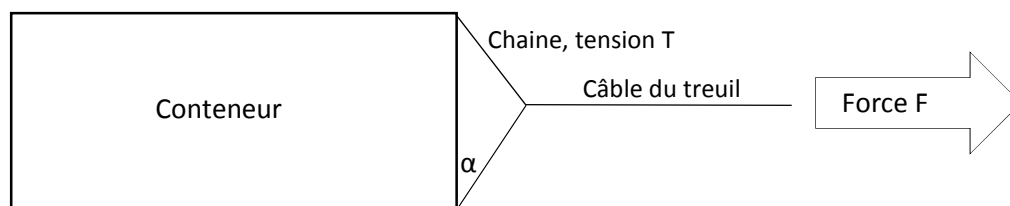


Figure 4. Agencement du conteneur, d'une chaîne et d'un câble de treuil.

La force que peut appliquer le treuil varie en fonction du nombre de tours (rangs) enroulés sur le tambour du treuil. Madame Stéphanie Deschamps de la CNESST m'a rapporté qu'au moment de l'accident, il y avait au moins 3 tours de câble enroulés sur le tambour.

Le treuil qui était installé sur le camion et qui a été utilisé lors de l'accident était fabriqué par la compagnie Ramsey² et présentait une capacité de 25 000 lbs. Le manuel d'instruction du treuil, réf. [7], donne la force de tirage en fonction du nombre de rangs enroulés sur le tambour. Pour 3 rangs, cette force est de 17 900 lbs, soit 8110 kg.

Cette force est la charge maximale qu'il est possible d'appliquer avec le treuil si trois rangs de câble sont déjà enroulés sur le tambour. Cependant, lors du tirage d'un conteneur, la charge réelle appliquée n'atteint pas nécessairement cette charge maximale possible. La charge réelle appliquée dépend de plusieurs facteurs, dont le poids du conteneur, le coefficient de friction ou de blocage du conteneur avec le sol, l'angle de la plate-forme sur lequel il est tiré par rapport au sol. Ces aspects seront discutés dans ce qui suit. Un facteur de transfert unitaire du poids du conteneur en charge horizontale appliquée par le câble sera utilisé pour une première analyse de l'effet de l'angle de la chaîne par rapport à la base du conteneur sur la tension T résultante. Appliquer un facteur de transfert unitaire du poids correspond à un coefficient de friction de 1 lors du tirage sur une surface horizontale.

Considérant donc une force de tirage de 5000 lbs dans le câble du treuil, le graphique de la figure 5 présente la tension T résultante dans la chaîne en fonction de l'angle α de celle-ci par rapport à la base du conteneur. On y remarque que même pour cette force correspondant à seulement 28% de la force totale qu'il est possible d'appliquer avec le treuil et 3 rangs de câble enroulés sur le tambour, la tension résultante dans la chaîne est très importante pour de faibles angles. Pour un angle de 5 degrés, la tension résultante est de 28 680 lbs. Pour une chaîne de grade 70 de dimension nominale de 3/8", cette tension résultante excède à la fois la charge limite de travail de 6600 lbs et la charge de rupture de 26 400 lbs. Le graphique de la figure 5 et le raisonnement présenté dans ce paragraphe ont comme hypothèse de départ que la tension dans le câble était de 5000 lbs. Si le coefficient de friction ou de blocage était plus grand, ce qui est probable, la force appliquée par le câble du treuil a pu être jusqu'à plus de 3 fois plus importante, tout comme la charge résultante dans la chaîne pour un angle donné, qui est présentée à la figure 5 pour une force de 5000 lbs dans le câble.

La charge de travail maximale spécifiée par le fabricant pour la chaîne de 3/8" et de grade 70 est de 6600 lbs. Pour une charge de tirage de 5000 lbs, cette limite est atteinte pour un angle de 22 degrés.

D'autre part, si le conteneur était effectivement bloqué par la glace, c'est-à-dire que le conteneur était apte à fournir une grande force s'opposant au mouvement, le treuil avec 3 tours d'enroulement a une capacité d'atteindre la charge de rupture à tout angle plus faible que 19.8 degrés. On peut donc observer que l'angle de la chaîne par rapport à la base du conteneur est un paramètre crucial de cette méthode de fixation.

Un autre scénario d'analyse peut être envisagé en considérant l'angle probable de la chaîne lors de l'accident et la charge de rupture observée pour un échantillon de cette chaîne dans le rapport du Centre de métallurgie du Québec (résistance ultime de 24 700 lbs). Mesdames Stéphanie

² www.ramsey.com

Deschamps et Alexandra Miranda-Chang ont effectué en août 2016 une simulation afin de mesurer expérimentalement l'angle probable entre la chaîne et le conteneur lors de l'accident. D'après les mesures qui m'ont été fournies, cet angle α était de 16.5 degrés. Si l'on suppose également que toute la chaîne présentait une résistance ultime similaire à celle mesurée sur l'échantillon, soit 24 700 lbs, on peut calculer la force qui a dû être appliquée par le treuil pour causer la rupture de la chaîne :

$$F = 2 T \sin \alpha$$

$$F = 2 \times (24\,700 \text{ lbs}) \sin (16.5^\circ) = 14\,030 \text{ lbs}$$

Cette force est inférieure à la force de 17 900 lbs que peut appliquer le treuil avec trois rangs de câble enroulés sur le tambour. Le treuil avait donc la capacité de provoquer la rupture de la chaîne pour cet angle. Finalement, si l'on fait l'hypothèse que le conteneur était bloqué au sol et que toute la force de 17 900 lbs du treuil a été appliquée au câble, la force résultante dans la chaîne pour l'angle de 16.5 degrés (angle estimé comme étant l'angle lors de l'accident) est de 31 500 lbs, soit une valeur dépassant la charge de rupture observée sur l'échantillon de la chaîne de l'accident (24 700 lbs) et dépassant aussi la charge de rupture observée sur l'échantillon de chaîne neuve de grade 70 (30 300 lbs).

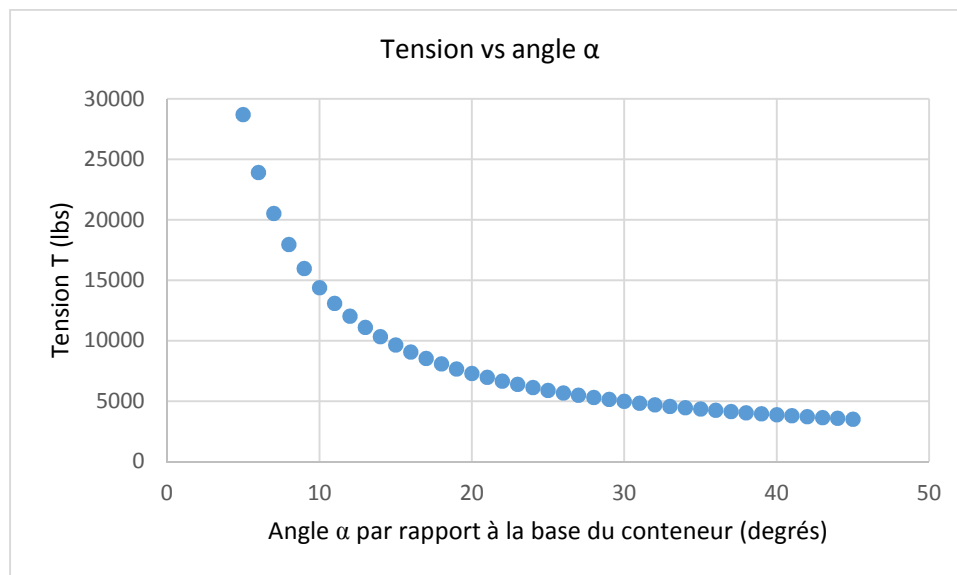


Figure 5. Graphique de la tension T résultante dans la chaîne en fonction de l'angle de celle-ci par rapport à la base du conteneur pour une force de 5000 lbs dans le câble du treuil.

Efforts potentiels sur la chaîne utilisée lors de l'accident compte tenu des conditions et des circonstances

Il n'est pas possible de déterminer avec précision le coefficient de friction ou de blocage résultant de l'interaction du conteneur avec le sol, car les conditions qui prévalaient lors de l'accident ne sont pas connues. Cependant, certaines informations nous permettent un cheminement logique permettant de formuler des hypothèses plausibles.

L'accident est survenu le 1^{er} mars 2016. Le conteneur était à cet emplacement depuis le printemps 2015, soit un an auparavant. L'emplacement était un terrain gazonné et boueux. À l'été 2015, l'effet de la pluie a engendré un enfoncement du conteneur dans le sol. Cet enfoncement était tel que les portes du conteneur, situées du côté avant par lequel il fut tiré lors de l'accident, n'ouvraient plus. À ce moment (été 2015) des blocs de bois durent être installés à l'avant pour surélever cette extrémité afin de pouvoir ouvrir les portes. Il est raisonnable de penser que l'arrière devait lui aussi être enfoncé dans le sol. Aucune mesure n'a été prise à ce moment pour surélever cette extrémité comme cela avait été fait à l'avant. On peut donc supposer que lorsque le froid s'est installé au début de l'hiver, en décembre 2015, le sol qui devait à ce moment avoir épousé la forme et entouré les poutres et les éléments structuraux sous le conteneur a gelé et produit un certain encastrement assez rigide au-dessous du conteneur.

Les photos des figures 6 et 7 présentent le dessous du conteneur impliqué dans l'accident. Il est d'une construction habituelle pour ce genre d'équipement, à savoir des poutres longitudinales correspondant aux arrêtes inférieures des plus longs côtés du conteneur, qui sont reliées par une série de poutres transversales sur lesquelles reposent les plaques d'acier constituant le fond du conteneur. On peut y remarquer que ces poutres sont abimées, irrégulières, et on peut présumer que la géométrie globale du dessous du conteneur présente un bon potentiel à s'agripper à un sol peu solide, et qu'elle présente également un bon potentiel à être investie de neige et de glace se logeant dans les espaces entre les poutres. On peut également remarquer que le sol sur lequel reposait le conteneur est couvert de glace, et que celle-ci, malgré le fait qu'elle ait pu fondre pendant 23 journées printanières entre l'accident et la prise de la photo, présente encore des rainures dans la direction des poutres transversales du dessous du conteneur. Ces rainures étaient probablement plus protubérantes le jour de l'accident (le 1^{er} mars 2016) et ont pu provoquer un certain blocage au mouvement du conteneur.

Lors de la manœuvre de l'accident, le 1^{er} mars 2016, le travailleur a d'abord levé de 4 pieds l'extrémité avant du conteneur, celle où se trouvaient les portes et qui avait été surélevée sur des blocs de bois. L'autre extrémité est demeurée au sol. À cause des remblais de neige de chaque côté du conteneur, le travailleur ne pouvait pas bien voir le dessous du conteneur et l'état de la surface. Il est donc possible que le conteneur, après avoir été soulevé de 4 pieds lors de cette manœuvre préliminaire, soit simplement redescendu et que les poutres transversales se soient de nouveau logées dans des rainures de neige et de glace. Une telle situation a pu offrir une grande résistance au mouvement, un blocage plutôt qu'un frottement.

Le 1^{er} mars, après l'accident, il n'y a pas eu d'inspection ou de photos du dessous du conteneur et de la surface sur laquelle il reposait lors de l'accident, photos qui auraient permis d'apprécier le profil de la glace et sa pénétration entre les poutres pour produire un effet de blocage.



Figure 6. Photo prise le 24 mars illustrant le dessous du conteneur et la surface où il reposait, telle qu'elle se présentait 23 jours après l'accident (source CNESST).



Figure 7. Photo prise le 24 mars illustrant le dessous du conteneur (source CNESST).

Lors de l'accident, le 1^{er} mars 2016, la manœuvre a été exécutée selon le protocole suivant :

- levée du conteneur d'une hauteur de 4 pieds, pour vérifier s'il adhère au sol et le décoller le cas échéant;
- redescente du conteneur;
- insertion de la plate-forme sous la base du conteneur. La forme très effilée de l'extrémité de la plate-forme permet une telle insertion sous le conteneur;
- installation de la chaîne dans une configuration similaire à celle représentée à la figure 2;
- accrochage du crochet du câble du treuil à la chaîne;
- actionnement du treuil pour tendre le câble et tirer le conteneur.

Madame Stéphanie Deschamps m'a rapporté qu'au moment où la tension a été appliquée au câble du treuil, la chaîne s'est brisée avant même que le conteneur ne bouge. Il s'agit donc d'une situation dans laquelle soit le coefficient de friction était très élevé, soit il y avait blocage, ce qui rendait impossible le déplacement sans l'atteinte d'une charge dépassant la capacité de la chaîne.

Considérations sur l'augmentation de la charge produite par l'angle de tirage par rapport à l'horizontale

Le schéma présenté à la figure 4 simplifie la situation en situant toutes les forces dans un plan horizontal. Dans la réalité, la plate-forme et le câble du treuil étaient inclinés lors de la manœuvre de l'accident. L'annexe 1 présente deux schémas qui m'ont été fournis par la CNESST pour exprimer les dimensions de la plate-forme du camion avec le conteneur, dans une configuration similaire à celle de l'accident.

L'angle θ entre la plate-forme du camion et l'horizontale peut être calculé à partir de l'expression suivante :

$$200.6 \text{ cm} - 25 \text{ cm} (\cos \theta) = 707.3 \text{ cm} (\tan \theta)$$

et la valeur obtenue est $\theta = 14$ degrés.

Dans ce qui précède, il a été exposé clairement que l'évaluation de la charge réelle dans la direction du câble du treuil n'est pas possible à cause de la méconnaissance du coefficient de friction ou du blocage qui pouvait prévaloir lors de l'accident. Pour cette raison, un calcul de référence a été effectué avec une charge de tirage correspondant au poids du conteneur auquel a été appliqué un coefficient de frottement de 1, soit 5000 lbs.

Le fait que la plate-forme fut inclinée à un angle de 14 degrés permet de calculer que quelque fut la charge de résistance au mouvement offerte par le conteneur à cause de la friction ou du blocage, le câble devait aussi vaincre une force additionnelle pour la montée du conteneur sur le plan incliné. Cette force additionnelle, égale à $W \sin \theta$ et identifiée comme telle sur la figure de l'annexe 1, est de 1200 lbs, ce qui n'est pas négligeable.

Évaluation des efforts additionnels produits par l’emprise du crochet de la chaîne sur un maillon : simulations numériques par éléments finis.

Dans ce qui m’a été rapporté, par la CNESST, et aussi dans le rapport d’expertise du Centre de Métallurgie du Québec, réf. [5], une hypothèse a été formulée, à savoir que le maillon de la chaîne qui a rompu était celui qui subissait, en plus de la tension dans la chaîne, un effort latéral dû à l’emprise du crochet fermé de la chaîne.

Une telle configuration (illustrée à la figure 8) impose au maillon qui subit l’emprise du crochet un effort latéral, ce qui peut causer une augmentation de la contrainte à certains endroits dans le matériau.

Le rapport d’expertise du Centre de Métallurgie du Québec, réf. [5], expose à la page 9 : « La présence de déchirures en V sur la face latérale du maillon brisé dans la zone d’amorce du bris témoigne d’un effet de surcharge jumelé à un effet de flexion localisé. Cette association peut s’expliquer par la présence d’un crochet, c’est-à-dire une traction latérale exercée par un crochet sur la chaîne jumelé à un étirement excessif de celle-ci. »

Ce rapport expose également, dans ses conclusions de la page 11 : « Considérant les éléments énumérés en discussion, nous sommes d’avis que trois facteurs sont à l’origine du bris de la chaîne en service, soit un effet de flexion par traction latérale d’un crochet, la traction d’une charge supérieure à la capacité de la chaîne, et la détérioration de la surface de la chaîne par corrosion.»

Afin d’évaluer l’effet d’un effort de flexion sur les contraintes dans un maillon de la chaîne, une série de simulations par éléments finis ont été effectuées.



Figure 8. Photo illustrant la géométrie du joint de la boucle, c'est-à-dire l'emprise du crochet fermé sur un maillon de la chaîne.

Des simulations ont d'abord été réalisées pour un maillon seul, d'une géométrie similaire à ceux de la chaîne utilisée lors de l'accident. La figure 9 présente les résultats d'une première simulation, pour laquelle seule une charge de tension de 29 430 N (3000 kg), correspondant à la charge limite de travail (« working load limit ») de cette chaîne, a d'abord été appliquée. Pour tous les résultats des simulations numériques présentées dans ce rapport, les figures illustrent les contraintes de Von Mises exprimées en MPa. Rappelons ici que cette chaîne présente un diamètre des tiges constituant les maillons de 9.53 mm, ce qui correspond à une section pour les deux côtés d'un maillon de 142.66 mm². Cette charge de 29 430 N produit une contrainte moyenne en tension de 206.3 MPa dans les sections rectilignes des maillons (sections identifiées « A » sur la figure 9). Considérant l'échelle de la figure 9 illustrant le niveau de contraintes en MPa (échelle variant de 0 à 1000 MPa), on peut observer que la distribution de contraintes dans ces deux sections rectilignes du maillon n'est pas uniforme, et qu'elle varie entre 50 et 525 MPa, ce qui est consistant avec la valeur moyenne calculée de 206.3 MPa.

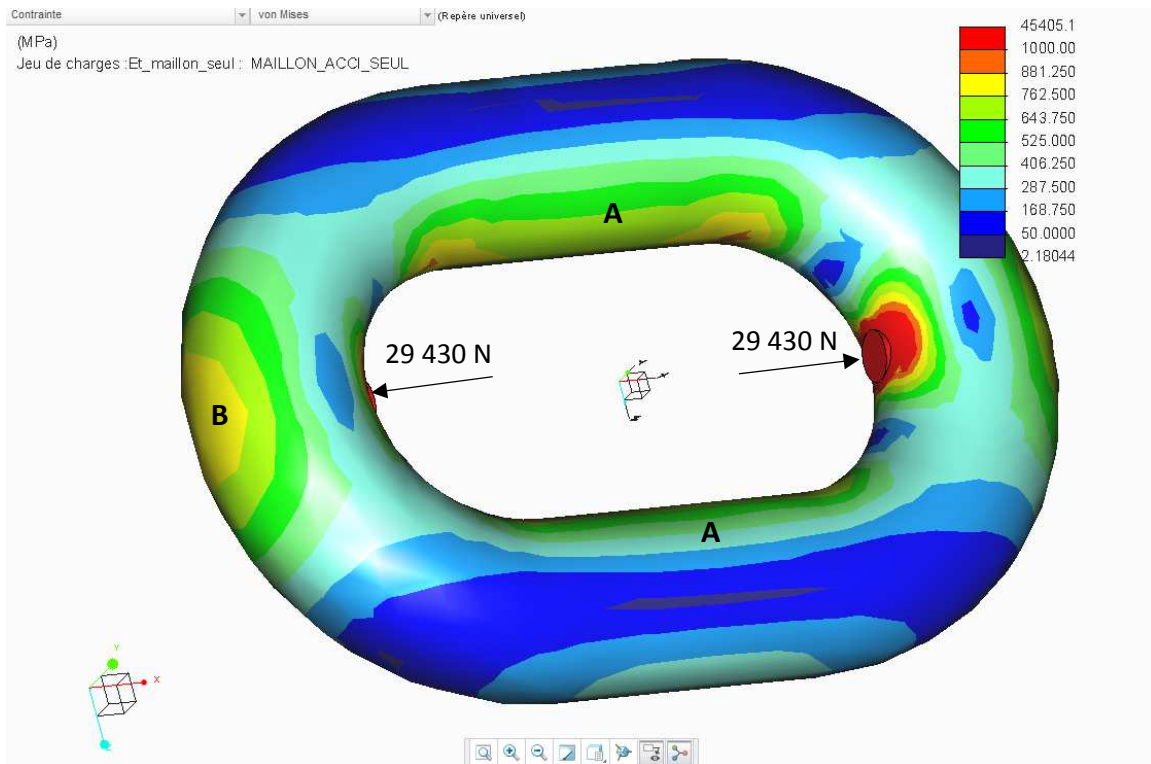


Figure 9. Simulation numérique, contraintes de Von Mises (en MPa) pour un maillon simple soumis à une charge de 29 430 N en tension.

On peut également observer sur la partie du maillon située à gauche et identifiée « B » sur la figure 9, un niveau de contraintes significatif (en jaune, 760 MPa), qui est attribuable au fait que les deux parties hémitoroïdales des maillons travaillent aussi en flexion sous l'effet de la charge appliquée au centre sur les surfaces internes. En d'autres termes, même dans une chaîne sollicitée uniquement en tension, certaines régions des maillons comportent des efforts combinés de tension et de flexion, avec également des efforts en cisaillement. On peut aussi remarquer que dans la partie interne des deux sections rectilignes du maillon (identifiées « A »), un niveau de contraintes comparable est atteint (en jaune, 760 MPa).

Dans une deuxième simulation, un effort latéral de 22 300 N, correspondant à une force de tirage de 5000 lbs, a été ajoutée à la force de tension de 29 430 N. Cet effort a été appliqué sur le côté du maillon, afin de pouvoir apprécier l'effet d'un tel effort latéral sur les contraintes dans le matériau. Les résultats sont présentés aux figures 10 et 11. Dans cette configuration, la tension dans la chaîne ne dépasse pas la charge limite de travail de 3000 kg, et une force latérale correspondant au poids d'un conteneur de 5000 lbs est appliquée, comme si par exemple le crochet d'un treuil appliquait une force de tirage correspondant au poids du conteneur avec un coefficient de frottement de 1.

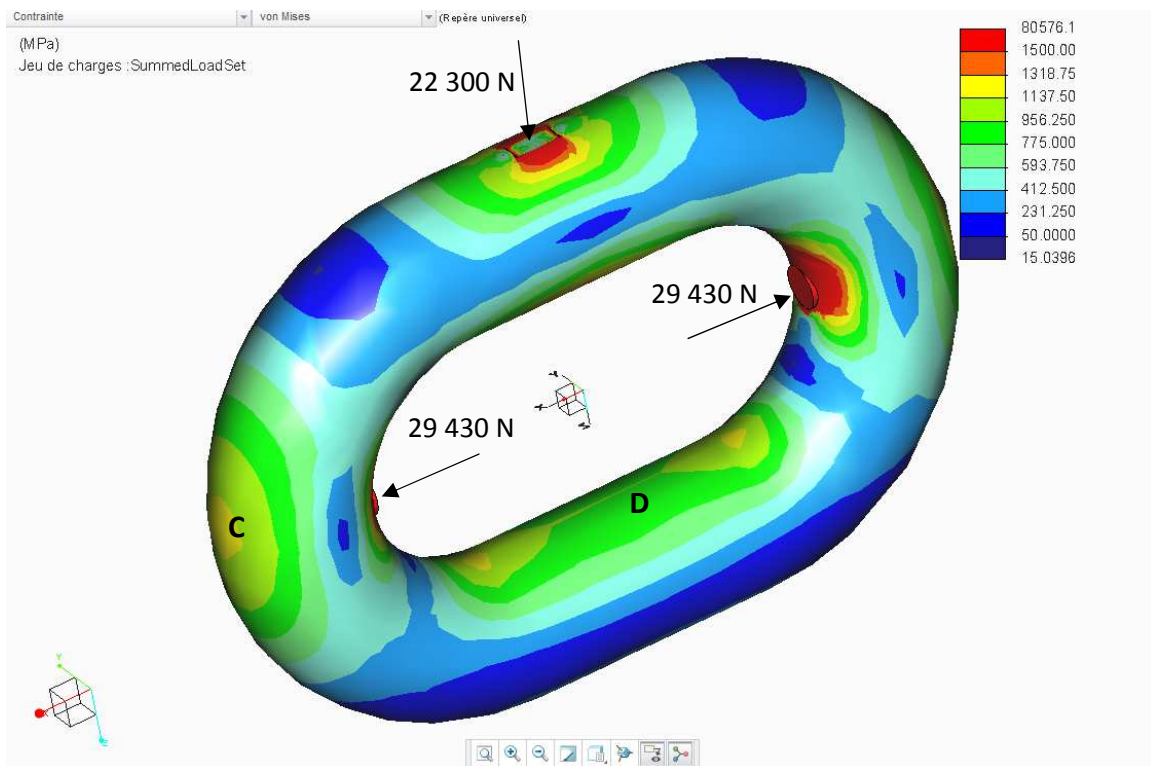


Figure 10. Simulation numérique, contraintes de Von Mises (en MPa) pour un maillon simple soumis à une charge de 29 430 N en tension et une charge latérale de 22 300 N.

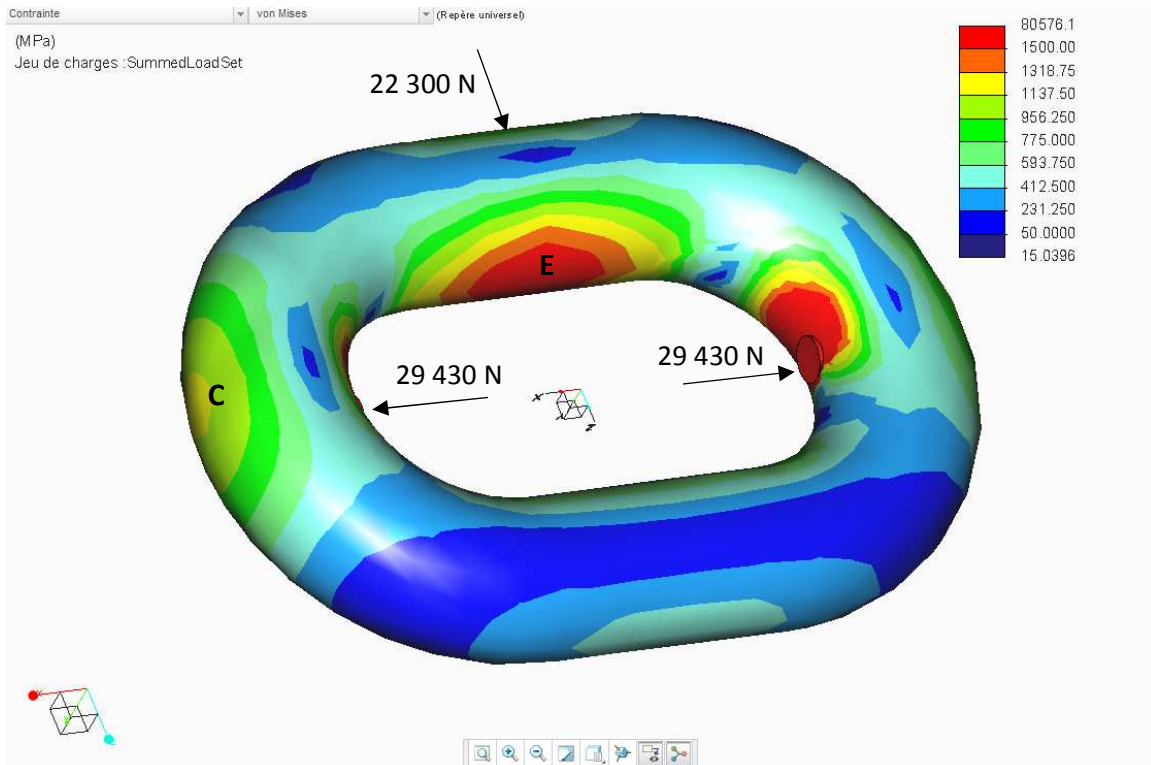


Figure 11. Simulation numérique, contraintes de Von Mises (en MPa) pour un maillon simple soumis à une charge de 29 430 N en tension et une charge latérale de 22 300 N.

Noter que l'échelle des couleurs des figures 10 et 11 illustrant le niveau des contraintes de Von Mises varie ici de 0 à 1500 MPa, plutôt que de 0 à 1000 MPa comme sur la figure 9. On peut tout d'abord remarquer que les extrémités du maillon (identifiées « C » sur les figures 10 et 11) présentent ici encore un niveau de contraintes significatif (le jaune est maintenant à 1137 MPa alors qu'il était à 760 MPa sur la figure 9). La surface interne de la section rectiligne du maillon où est appliquée la force latérale (identifiée « E » sur la figure 11) présente une contrainte dépassant 1500 MPa (zone en rouge). Cette région était déjà la plus sollicitée de la partie rectiligne du maillon dans la première simulation pour laquelle la force latérale était absente, et la contrainte se trouve dans cette nouvelle simulation augmentée davantage par la présence de cette force latérale. La section rectiligne opposée (identifiée « D » sur la figure 10), c'est-à-dire celle où n'est pas appliquée la force, ne présente pas cette augmentation. Dans cette région, le niveau de contrainte s'apparente à celui de la simulation sans force latérale (région identifiée « A » sur la figure 9).

Une troisième simulation a été effectuée, cette fois pour reproduire la géométrie d'une chaîne formant une boucle avec un retour du crochet fermé et son emprise sur un maillon. La figure 12 illustre le modèle 3D réalisé pour représenter la région de l'emprise du crochet. Ce modèle est similaire à la situation réelle illustrée sur la photo de la figure 8. Les figures 13 et 14 présentent le résultat de la simulation avec ce modèle. Une force de 14 715 N a été appliquée dans chacun des deux brins travaillant en parallèle, c'est-à-dire le bout de chaîne et le crochet (à gauche sur les figures 13 et 14). Sur ces mêmes figures, une force de 29 430 N correspondant à la charge limite de travail de 3000 kg est représentée dans le brin de chaîne travaillant seul (à droite sur les figures 13 et 14), mais bien entendu le modèle numérique calcule la valeur exacte de cette force en fonction des angles d'applications des deux autres forces. Tout d'abord, il est un peu surprenant de constater que des contraintes plus importantes sont observables sur les maillons identifiés « F » et « G » sur la figure 13 que pour les simulations effectuées avec un maillon seul chargé de façon uniaxiale (figure 9). Il s'agit vraisemblablement d'effets tridimensionnels de flexion qui peuvent être attribuables aux angles et aux différences d'alignement des maillons dans la zone de l'emprise du crochet fermé sur la chaîne. Sur la figure 14, on peut observer sur le maillon subissant l'emprise du crochet une région où le niveau de contrainte est élevé (identifiée « H » sur la figure 14), attribuable à l'effort latéral imposé par le crochet et provoquant une contrainte de flexion, ainsi qu'à la tridimensionnalité de la géométrie. Les résultats de ces simulations numériques suggèrent que la géométrie tridimensionnelle de l'assemblage et la présence d'efforts latéraux qui en résulte produit une augmentation du niveau de contrainte par rapport à ceux observés pour une tension uniaxiale de la chaîne.



Figure 12. Modèle représentant la région de l’emprise du crochet fermé sur un maillon de la chaîne.

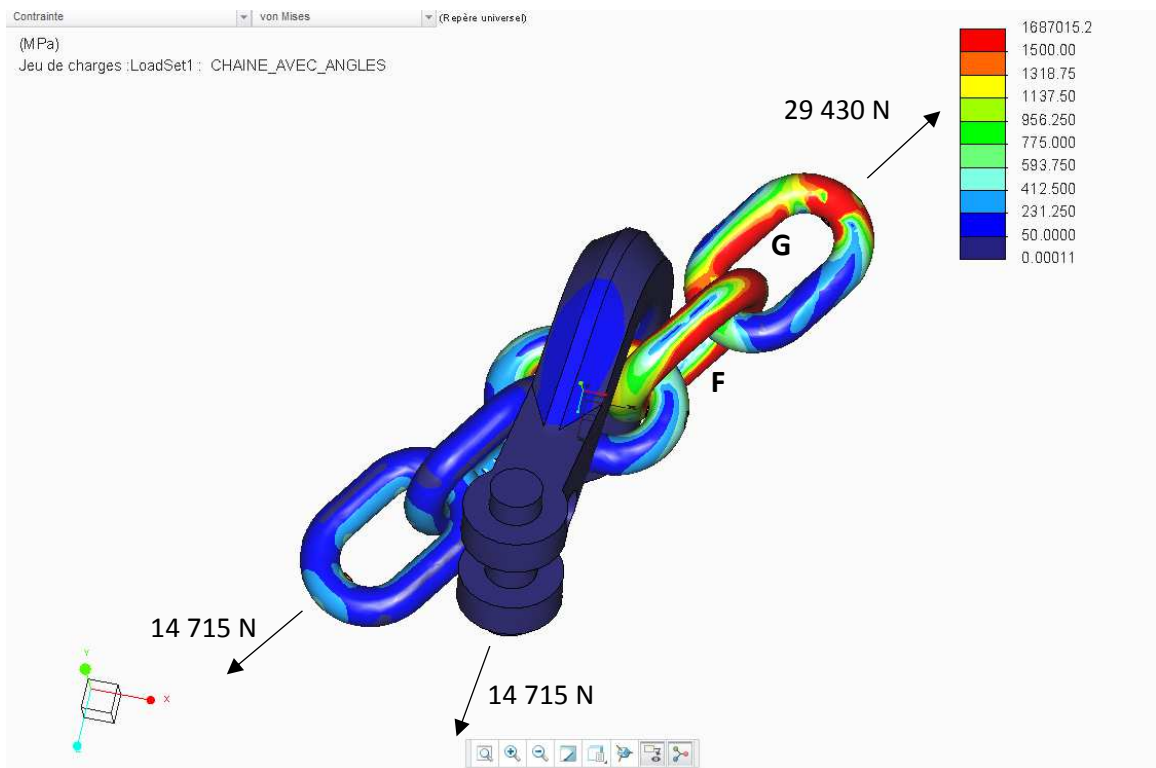


Figure 13. Simulation numérique de la région de l’emprise du crochet fermé sur un maillon de la chaîne, contraintes de Von Mises (en MPa)

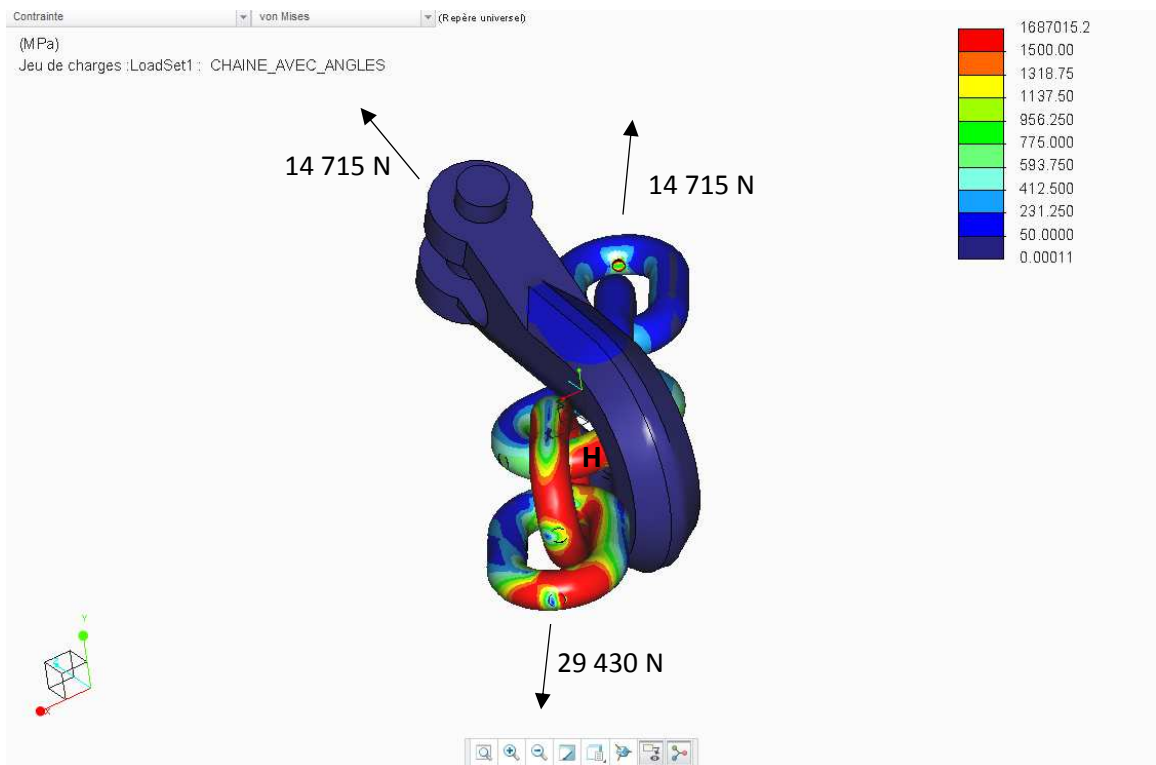


Figure 14. Simulation numérique de la région de l’emprise du crochet fermé sur un maillon de la chaîne, contraintes de Von Mises (en MPa).

Évaluation des efforts produits par l’emprise du crochet du treuil sur le maillon de la chaîne auquel il est accroché : simulation numérique par éléments finis.

De façon similaire à ce qui fut présenté à la section précédente, des simulations ont été faites pour la section de la chaîne sous l’emprise de la force de tirage du treuil. La figure 15 présente les résultats de la quatrième simulation, faite avec une seule force, soit une tension dans la chaîne correspondant à la charge limite de travail de 29 430 N (3000 kg). Le crochet est présent sur la figure mais il n’impose aucune force. On peut remarquer des niveaux de chargement dans les maillons de la chaîne qui sont très similaires à ceux obtenus pour un maillon seul avec un chargement de tension uniaxiale (figure 9).

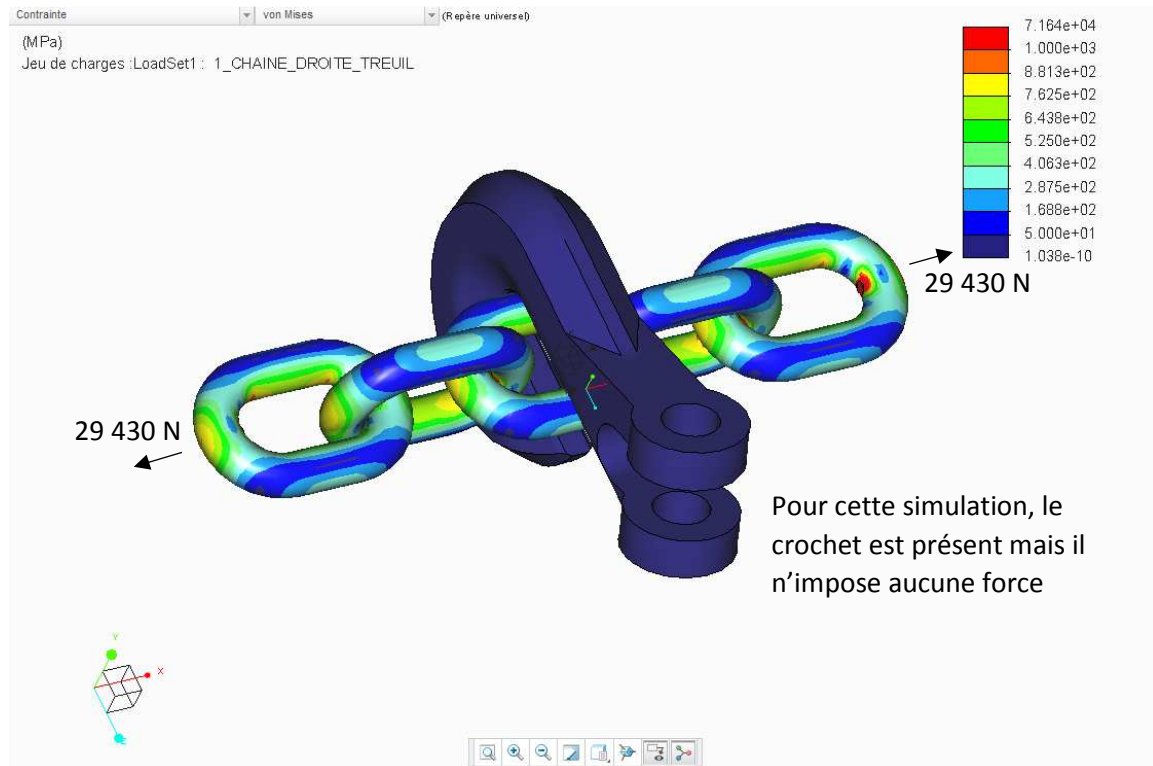


Figure 15. Quatrième simulation, tension axiale seule, aucune force exercée par le crochet du treuil, contraintes de Von Mises (en MPa).

Une cinquième simulation a ensuite été faite, en ajoutant à la tension de 29 430 N dans la chaîne une force de tirage de 22 300 N (5000 lbs) par le crochet, correspondant au poids d’un conteneur avec un coefficient de frottement de 1. Les résultats sont présentés aux figures 16 et 17. Pour cette simulation, on peut ici encore observer une augmentation du niveau de contraintes due à la force latérale. Ces régions se retrouvent aux points de contact entre les maillons, ainsi qu’au point de contact entre le crochet et le maillon qui subit son emprise.

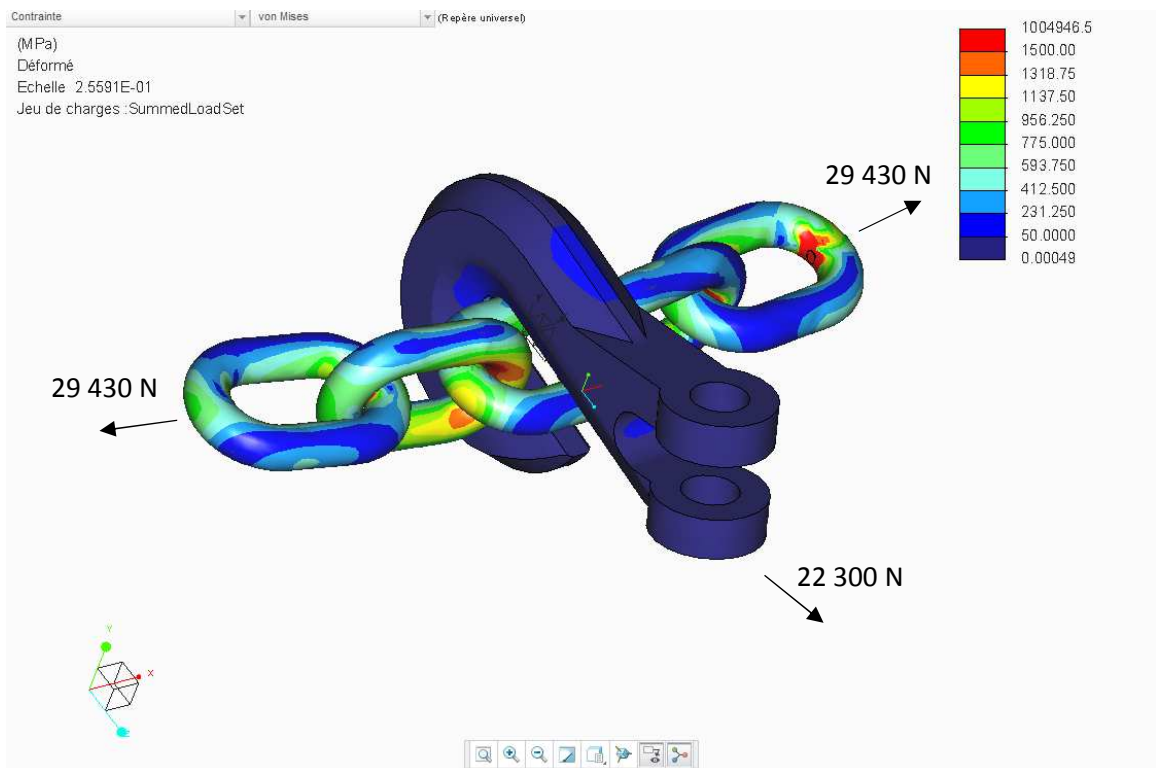


Figure 16. Cinquième simulation, tension de 29 430 N dans la chaine combinée à une force latérale de 22 300 N, contraintes de Von Mises (en MPa).

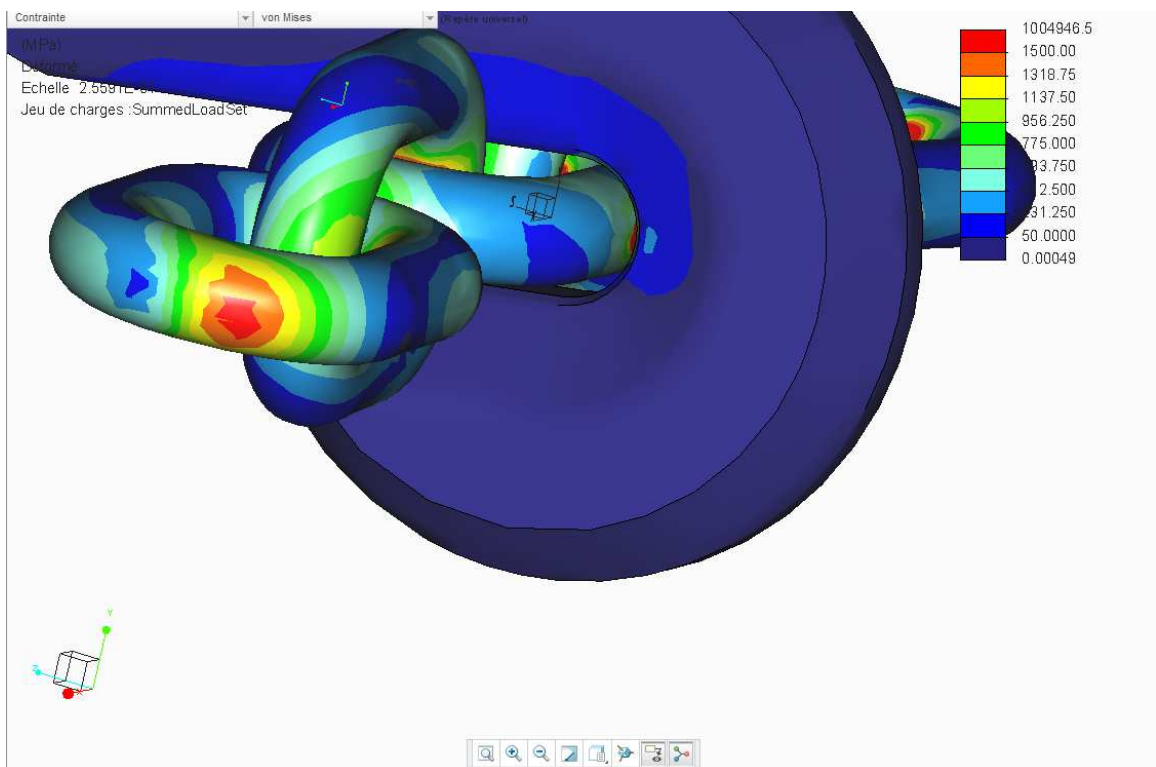


Figure 17. Cinquième simulation, tension de 29 430 N dans la chaine combinée à une force latérale de 22 300 N, contraintes de Von Mises (en MPa).

Principales conclusions du chapitre 1

En ce qui concerne la charge maximale admissible sur la chaîne :

Une comparaison des valeurs obtenues pour la chaîne utilisée lors de l'accident (qui présente une usure apparente, notamment de la corrosion) et celles obtenues pour une chaîne neuve permet de constater que l'usure peut diminuer significativement la résistance d'une chaîne et que celle-ci peut même se retrouver en dessous de la charge de rupture annoncée par le fabricant pour une chaîne neuve.

En ce qui concerne l'augmentation du niveau de contraintes dû à des efforts latéraux :

De façon générale, il n'est pas surprenant d'observer une augmentation du niveau de contrainte lorsqu'on ajoute des efforts latéraux. Ce qu'il est important de remarquer est que le fait de faire une boucle peut produire certaines régions où l'on retrouve des niveaux de contraintes supérieurs à ceux observés pour une tension uniaxiale de la chaîne.

En ce qui concerne la charge résultante sur la chaîne en fonction de son positionnement sur le conteneur :

Il s'agit en fait de l'aspect le plus critique de la méthode utilisée lors de l'accident. Le positionnement de la chaîne est crucial. Cette méthode est très propice à un positionnement de la chaîne suivant un angle faible qui produit des forces excédant non-seulement la charge de travail de la chaîne mais également la charge provoquant sa rupture.

Chapitre 2

Avis technique sur les quatre méthodes de travail utilisées par les travailleurs de l'entreprise lors de l'embarquement d'un conteneur sur une plate-forme de remorqueuse

Quatre méthodes m'ont été exposées par la CNESST pour commentaires et analyse.

Dans le but de bien comprendre chacune des méthodes, une visite a été réalisée au Centre de formation en transport de Charlesbourg (CFTC) afin que je puisse assister à une démonstration des différentes méthodes.

Cette visite a eu lieu le 6 juin 2016. Mesdames Stéphanie Deschamps et Alexandra Miranda-Chang de la CNESST ainsi que moi-même étions présents. Nous avons été reçus par Monsieur Sylvain Labrie, conseiller pédagogique et Monsieur Francis Gingras, enseignant dans le programme de DEP en transport par camion. Monsieur Gingras a effectué et commenté toutes les opérations de démonstration. Monsieur Labrie a également offert ses commentaires et son expertise. Je remercie Messieurs Labrie et Gingras pour leur excellent accueil et leur collaboration, ainsi que Monsieur Dave Beaulieu, directeur adjoint du CFTC.

Les photos présentées dans ce chapitre, sauf indication contraire, ont été prises le 6 juin 2016 lors de notre visite au CFTC.

Tel qu'il a été démontré au chapitre précédent dans les simulations numériques, des efforts latéraux exercés sur un maillon de la chaîne entraînent des efforts supplémentaires qui, s'ils se produisent lors d'une situation de chargement excessif de la chaîne, peuvent contribuer à l'atteinte de la limite ultime et la rupture de la chaîne. Il m'est apparu, lors des manœuvres effectuées au CFTC, que l'imposition d'efforts latéraux sur un ou des maillons de la chaîne est présente dans la plupart des méthodes.

1) Méthode à une chaîne correspondant à la méthode utilisée lors de l'accident

Cette méthode, illustrée aux figures 2, 3 et 4, a été largement discutée dans ce rapport. Tel que le présente le graphique de la figure 5, cette méthode peut entraîner, pour de faibles angles entre la chaîne et la base du conteneur, des très grandes forces dans la chaîne. Or, il est effectivement pratique courante avec cette méthode de tendre la chaîne afin qu'elle soit près du conteneur, donc à un angle faible, afin de pouvoir tirer le conteneur le plus près possible du treuil sur la plate-forme en une seule opération.

Dans cette méthode, le crochet ouvert situé à l'une des extrémités de la chaîne est introduit et fixé dans l'un des blocs de coin du conteneur (figure 18). La chaîne est ensuite tendue et une boucle est réalisée en passant l'autre extrémité de la chaîne, celle qui comporte un crochet fermé,

dans les deux trous du bloc de coin (figure 19) et la boucle est complétée en accrochant le crochet fermé sur un maillon de la chaîne. Le crochet du treuil est ensuite fixé au centre de la chaîne.

Les problèmes principaux de cette méthode sont :

- lorsque la chaîne est tendue et qu'un angle très faible résulte entre la chaîne et la base du conteneur, la force de tension peut devenir très grande et excéder la résistance ultime de la chaîne;
- l'emprise du crochet fermé sur un maillon de la chaîne induit une force latérale et des contraintes de flexion. Ces efforts, combinés à la tension dans la chaîne, augmentent la contrainte effective et peuvent provoquer la rupture de la chaîne;
- l'emprise du crochet du treuil sur un maillon de la chaîne induit également une force latérale et des contraintes de flexion dans le maillon. Ces efforts, combinés à la tension dans la chaîne, augmentent la contrainte effective et peuvent provoquer la rupture de la chaîne à cet endroit également.

D'autres problèmes peuvent également être rencontrés avec cette méthode. On peut observer sur la figure 18 que la position d'application de la charge dans la gorge du crochet peut être assez variable selon l'angle de la chaîne. Or un tel crochet est conçu pour reprendre une force au fond de la gorge. Lorsque le point d'application de la charge se déplace vers l'extrémité du crochet, la charge admissible diminue. Une telle application excentrée par rapport au fond de la gorge du crochet est possible avec cette méthode, ce qui n'est pas souhaitable. L'opérateur devrait toujours s'assurer que la configuration de la chaîne est telle que la force est appliquée au bon endroit sur le crochet. En ce qui concerne le passage de la chaîne dans le bloc de coin, on peut observer sur la figure 19 que certains maillons de la chaîne peuvent être chargés autrement qu'axialement, ce qui n'est pas souhaitable. La configuration de la chaîne à cet endroit peut entraîner des chargements combinés (autres qu'une tension axiale simple) qui peuvent provoquer des contraintes dépassant les limites admissibles.



Figure 18. Méthode à une chaîne, position du crochet ouvert (source CNESST).



Figure 19. Méthode à une chaîne, passage de la chaîne dans le bloc de coin (source CNESST).

2) Méthode avec chaîne en V

Cette méthode utilise un assemblage constitué de deux chaînes terminées par un autre type de crochets, soit des crochets en J. Les chaînes forment un V et sont reliées au centre, à l'endroit où est fixé le crochet du treuil. Il s'agit d'un équipement utilisé dans l'industrie du remorquage des voitures.

Les figures 20 et 21 présentent deux exemples de cette configuration.

Pour la configuration illustrée à la figure 20, on peut remarquer que le lien entre les deux chaînes est assuré par une emprise du crochet fermé de la chaîne de gauche sur un maillon de celle de droite.

Les problèmes principaux la configuration de la figure 20 sont :

- L'introduction des crochets en J dans les blocs de coins du conteneur ne laisse que peu ou pas de jeu. La tige principale du crochet n'est pas nécessairement alignée avec la chaîne, de sorte que la tension dans la chaîne peut induire un effort de flexion sur la tige et la base du crochet;
- l'emprise du crochet du treuil sur un maillon de la chaîne induit également une force latérale et des contraintes de flexion dans le maillon. Ces efforts, combinés à la tension dans la chaîne, augmentent la contrainte effective dans ce maillon.

La configuration de la figure 21 comporte également le problème d'alignement du crochet (très apparent sur la figure 21), et la tension dans la chaîne peut induire un effort de flexion sur la tige et la base du crochet. Par contre, dans cette configuration, le problème relié à l'emprise du crochet du treuil sur un maillon de la chaîne est absent, étant donné la présence de l'anneau central. Ceci constitue un avantage.

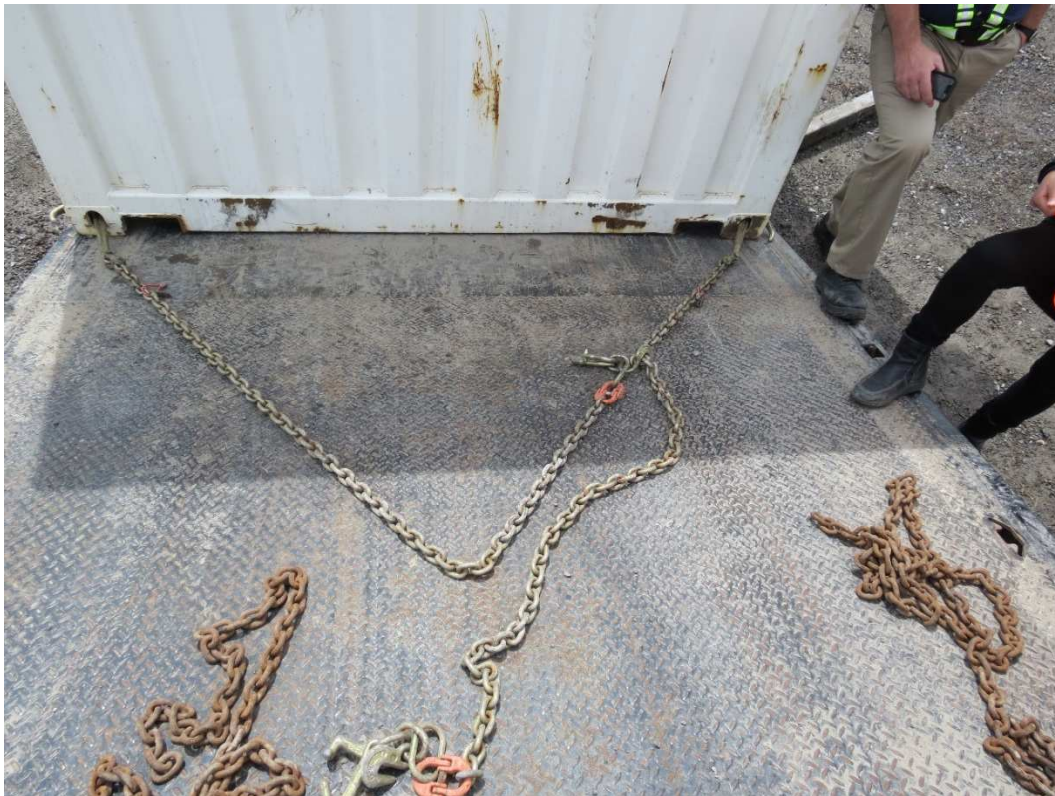


Figure 20. Méthode avec chaine en V.



Figure 21. Méthode avec chaine en V, configuration avec anneau central.

Une version alternative de l'équipement est illustrée à la figure 22³, et est constituée de chaînes plutôt que de courroies de nylon. Cette configuration présente les mêmes caractéristiques que celui de la figure 21 : problème d'alignement du crochet, et présence d'un anneau central qui présente l'avantage de ne pas induire d'efforts latéraux sur un maillon de la chaîne.



Figure 22. Équipement pour chaîne en V, configuration avec anneau central et chaînes⁴.

3) Méthode à deux chaînes

Cette méthode, illustrée aux figures 23, 24, 25 et 26, utilise deux chaînes telles que celle utilisée lors de l'accident, plutôt qu'une seule. Dans cette méthode, les crochets ouverts sont installés dans les coins d'attache inférieurs du conteneur et les crochets fermés permettent de relier les deux chaînes entre elles.

D'après ce qui m'a été exposé, le raisonnement justifiant cette méthode semble être que deux chaînes sont plus résistantes qu'une seule, et/ou qu'elles offrent une certaine sécurité dans le cas du bris d'une des deux chaînes. Par contre, il est possible de constater et observant les figures 24 et 25 qu'à l'endroit où les crochets ouverts sont fixés aux blocs de coin, il existe une courte section où une seule chaîne reprend tous les efforts. C'est donc le point faible de cet arrangement et l'effet du dédoublement de chaîne est perdu. Par ailleurs, à cet endroit, on retrouve une emprise latérale de crochet fermé sur un maillon, ce qui peut augmenter le niveau de contraintes.

On peut remarquer, sur les figures 24 et 25, que le premier maillon de la chaîne exerce une force de côté sur la manille du crochet ouvert qui est inséré dans le bloc de coin, ce qui n'est pas un mode d'opération pour lequel a été conçue la manille du crochet. Une trop grande force pourrait rompre cet élément.

Finalement, en observant la figure 26, on peut observer que la chaîne est double à l'endroit où est accroché le crochet du treuil. La force dans chaque chaîne est donc la moitié de la charge

³ Source : photo fournie par le détaillant d'équipements industriels Lam-e inc.

⁴ Source : photo fournie par le détaillant d'équipements industriels Lam-e inc.

totale reprise par les deux chaînes. Par contre, la force latérale exercée par le crochet sur les maillons produit à cet endroit une contrainte de flexion, ce qui n'est pas souhaitable.

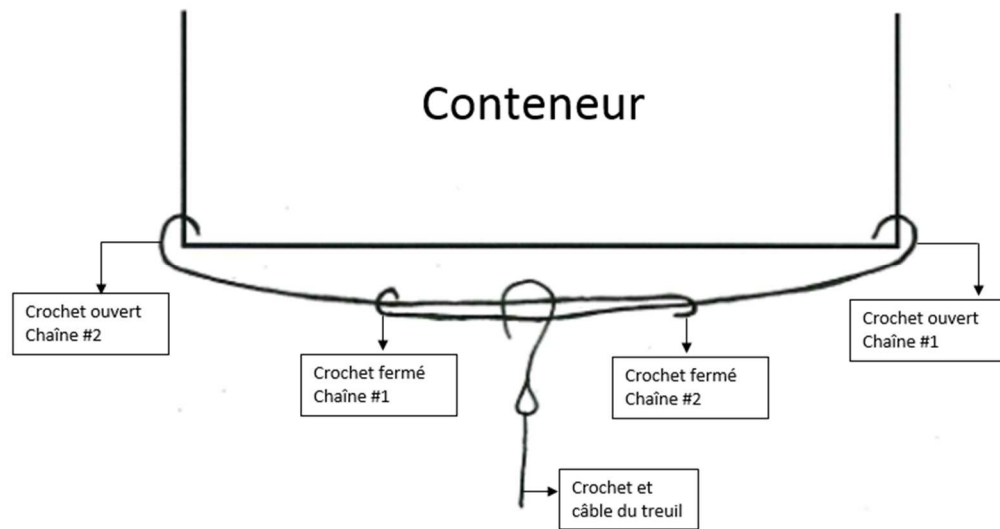


Figure 23. Illustration schématique de la méthode à deux chaînes (source CNESST).

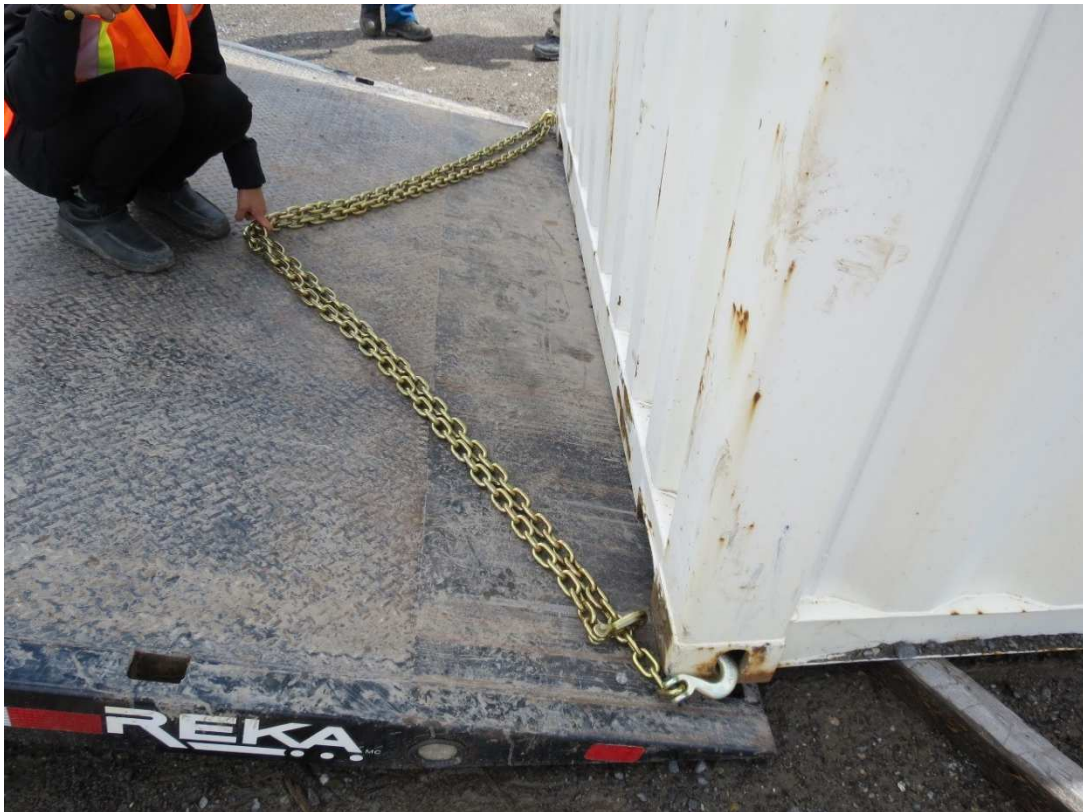


Figure 24. Méthode à deux chaînes.

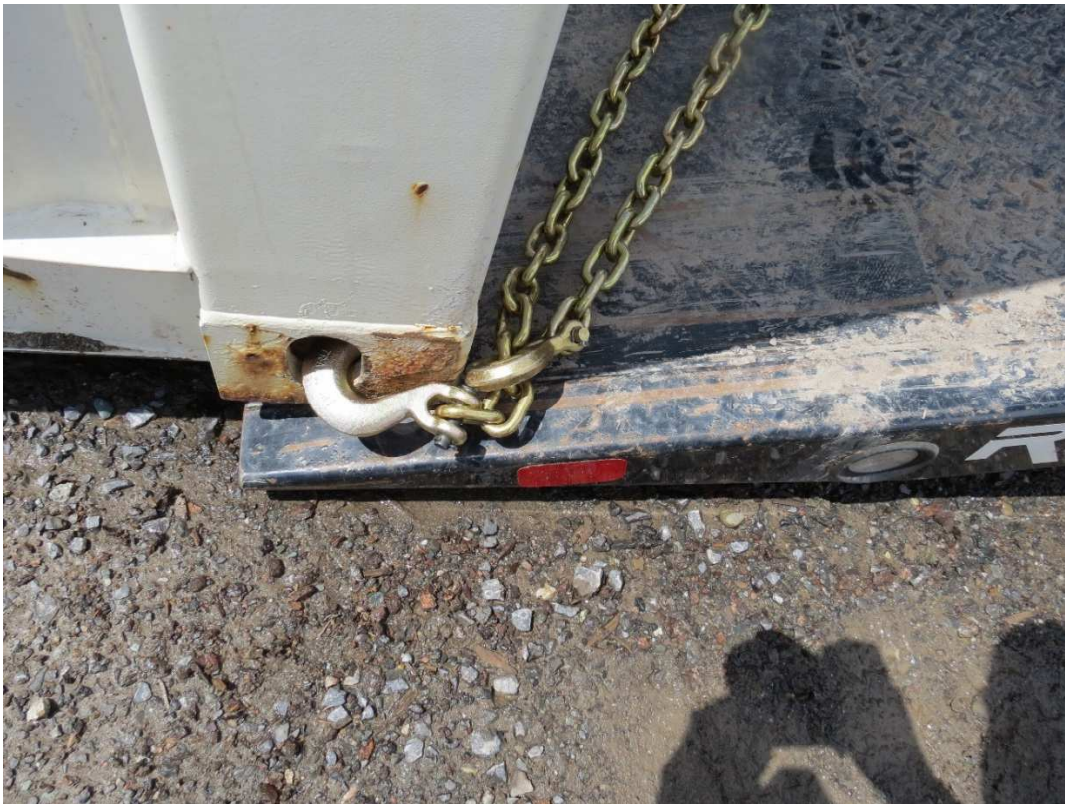


Figure 25. Méthode à deux chaînes, emprise du crochet ouvert dans le bloc de coin.

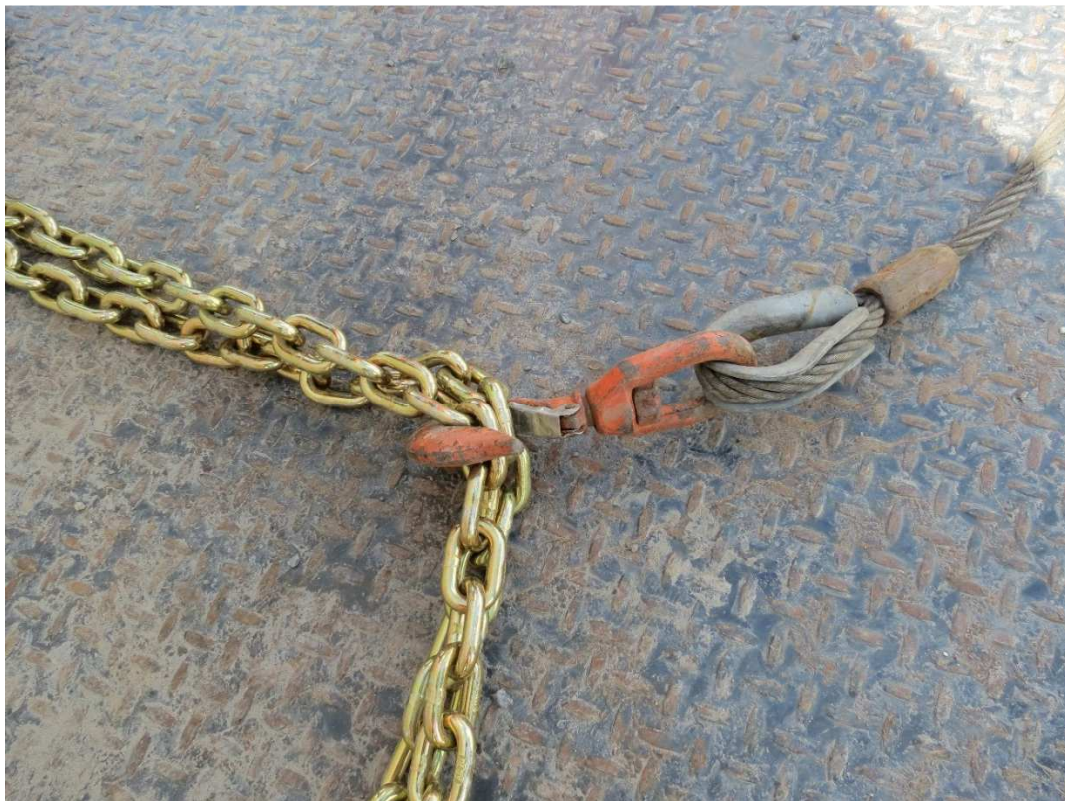


Figure 26. Méthode à deux chaînes, emprise du crochet du treuil sur les deux chaînes.

4) Méthode à deux chaînes en boucle formant un assemblage en V

Cette méthode illustrée aux figures 27, 28, et 29 utilise également deux chaînes similaires à celle utilisée lors de l'accident. Dans cette méthode, deux boucles sont formées et se rejoignent au centre, à l'endroit où est accroché le crochet du treuil. Chaque boucle passe dans un bloc de coin, par les deux trous du bloc. Le crochet fermé de chaque chaîne est utilisé pour fermer la boucle à la longueur voulue, et le bout de chaîne comportant le crochet ouvert est laissé libre. L'extrémité de chacune des boucles est insérée dans le crochet du treuil. La longueur des deux boucles peut être diminuée lorsque le conteneur approche du treuil, afin de diminuer la distance non-utilisable.

Cette méthode permet, avec des boucles plus longues, de ne pas générer de trop grandes forces dans les chaînes au début de la manœuvre, lorsque le conteneur frotte sur le sol et que la friction peut être plus grande. À la fin de la manœuvre, la longueur des boucles peut être réduite afin de pouvoir approcher le conteneur le plus près possible du treuil.

Le fait de pouvoir réaliser des boucles plus courtes comporte cependant les mêmes risques que dans le cas de la méthode utilisée lors de l'accident. En effet, si les boucles sont très courtes et qu'elles se retrouvent à un angle faible ou même parallèles à la base du conteneur, les forces dans chaque boucle peuvent devenir très grandes. De plus, étant donné que chaque boucle comporte une emprise du crochet fermé sur un maillon, une force latérale est produite, ce qui peut ici encore conduire à une contrainte combinée excédant la limite ultime du matériau.

Il est également possible d'observer, sur la figure 30, une autre particularité géométrique due au passage de la chaîne dans le bloc de coin. On peut voir sur la figure 30 qu'un maillon (identifié « A ») est appuyé sur le côté d'une plaque d'acier et qu'il est sollicité en flexion par les deux maillons voisins (identifiés « B »), ce qui n'est pas la méthode de chargement souhaitée pour un maillon de chaîne. Ce commentaire était également applicable à la première méthode (la méthode à une chaîne utilisée lors de l'accident), puisque celle-ci implique aussi le passage de la chaîne dans les deux trous d'un bloc de coin.

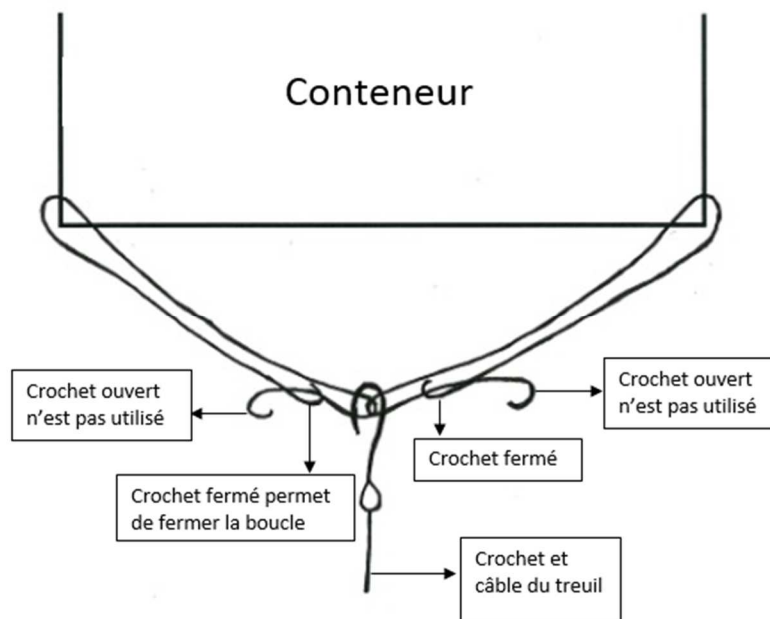


Figure 27. Illustration schématique de la méthode à deux chaînes en boucle (Source CNESST).



Figure 28. Méthode à deux chaînes en boucle.

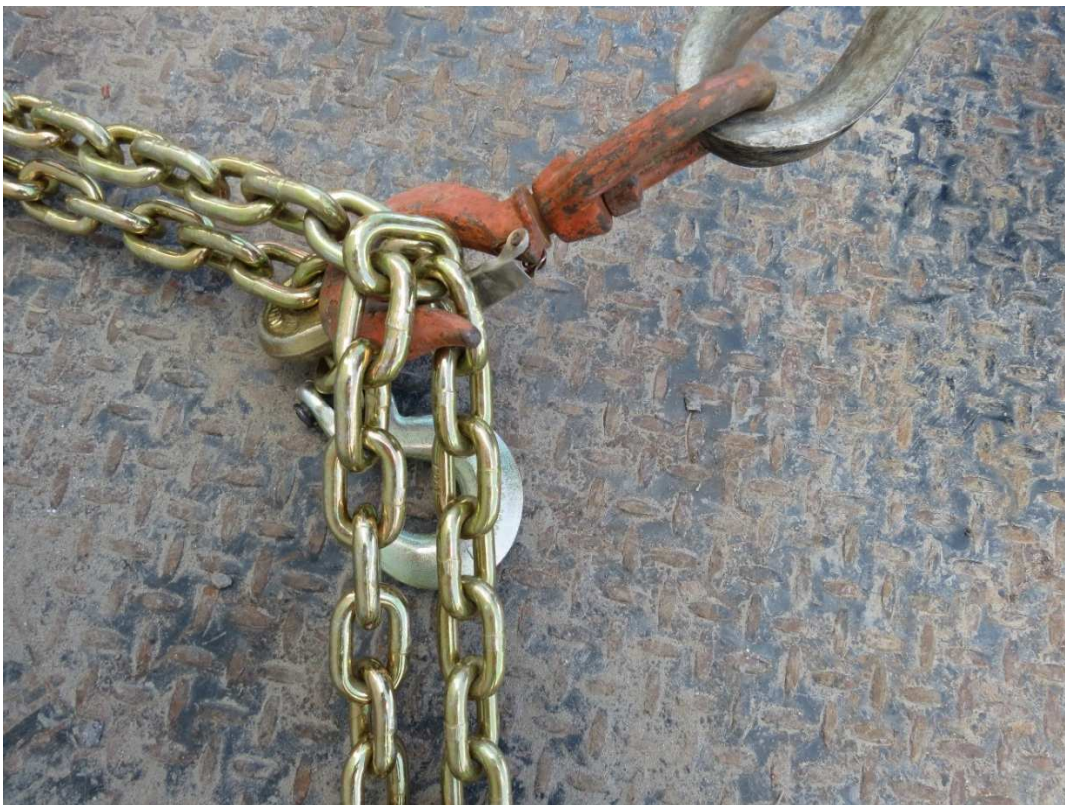


Figure 29. Méthode à deux chaînes en boucle, les deux boucles sont accrochées au crochet.



Figure 30. Méthode à deux chaînes en boucle, bloc de coin.

Conclusion

Différents aspects liés au contexte de la manutention de conteneurs maritimes par des camions de remorquage ont été abordés dans ce rapport d'expertise.

En ce qui concerne la charge maximale admissible sur la chaîne :

Une comparaison des valeurs obtenues pour la chaîne utilisée lors de l'accident (qui présente une usure apparente, notamment de la corrosion) et celles obtenues pour une chaîne neuve permet de constater que l'usure peut diminuer significativement la résistance d'une chaîne et que celle-ci peut même se retrouver en dessous de la limite ultime annoncée par le fabricant pour une chaîne neuve.

En ce qui concerne l'augmentation du niveau de contraintes dû à des efforts latéraux :

De façon générale, il n'est pas surprenant d'observer une augmentation du niveau de contrainte lorsqu'on ajoute des efforts latéraux à des efforts de chargement dans l'axe de la chaîne. Ce qu'il est important de remarquer est que pour une tension donnée dans la chaîne, le fait de faire une boucle peut produire certaines régions où l'on retrouve des niveaux de contraintes supérieurs à ceux observés pour une tension simple.

En ce qui concerne la charge résultante sur la chaîne en fonction de son positionnement sur le conteneur :

Il s'agit en fait de l'aspect le plus critique de la méthode utilisée lors de l'accident. Le positionnement de la chaîne est crucial. La méthode à une chaîne, c'est-à-dire celle utilisée lors de l'accident, est très propice à un positionnement de la chaîne avec un angle faible par rapport à la base du conteneur. Il a été démontré au chapitre 1 qu'un angle faible peut produire de très grandes forces, excédant non-seulement la charge de travail de la chaîne mais également la charge provoquant sa rupture.

En ce qui concerne les 4 méthodes analysées :

Elles comportent toutes certains problèmes ou risques de rupture accrus, dus au chargement non-adéquat de certains éléments. Aucune des quatre méthodes n'est parfaite. Par contre, le principal problème, peu importe le type de méthode, est de chercher à rapprocher le point d'attache du crochet du treuil de la base du conteneur, car ceci conduit à avoir un angle faible entre la chaîne reliant les deux blocs de coins et la base du conteneur, donc à imposer de très grands efforts à la chaîne.

Un autre problème est l'utilisation de chaînes de grade 70 pour le tirage de la charge. Il est mentionné explicitement dans les normes, ainsi que par les fabricants et distributeurs d'équipements, que ces chaînes ne sont pas faites pour le tirage ou le levage. Des chaînes de

grades supérieurs devraient impérativement être utilisées. Par contre, ceci n'éliminerait pas complètement le risque de rupture, car il serait encore possible dans certaines situations de dépasser la limite ultime de la chaîne, même avec un grade supérieur.

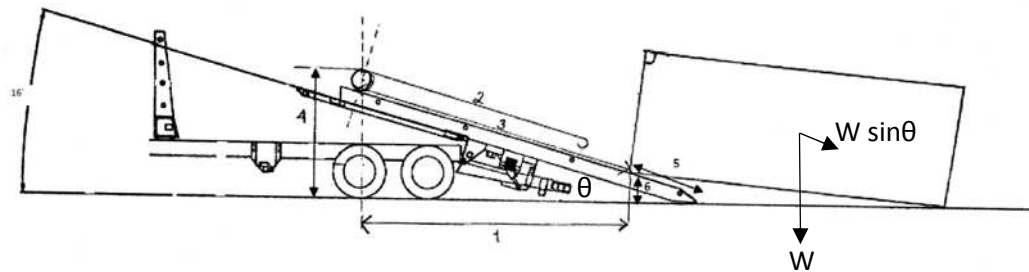
Jean Ruel, ing. Ph.D., le 22 septembre 2016

Références

- [1] Welded steel chain specifications. Norme NACM (National Association of Chain Manufacturers), 11 avril 2010.
- [2] Forged grade 30, grade 43, and Grade70 chain hook specifications. Norme NACM, 27 avril 2014.
- [3] Machinery's Handbook, 26e edition. Industrial Press, New York, 2000.
- [4] Des Matériaux, 2^e édition. Dorlot, J.-M., Bailon, J.-P., Masounave, J., Éditions de l'École Polytechnique de Montréal, 1986.
- [5] Bris d'une chaîne de camion lors du chargement d'un conteneur. Lafrenière, L., Centre de Métallurgie du Québec, Trois-Rivières, Québec, 26 mai 2016.
- [6] Understanding the difference between chain grades and how they're used, Columbus McKinnon, <http://blog.cmworks.com>.
- [7] Owner's Manual, Model H-800 Series, Dow-Lok Equipped, Industrial Low-Mount Winches, Ramsey Winch Company, Tulsa, Oklahoma. Brochure 914164-0305-A.
- [8] Camarao, A.F., Pereira, M.V., Darwish, F.A., Motta, S.H. 2004 Structural Mechanics Applied to Mooring Components Design. ECF15, 15th European Conference on Fracture, Stockholm, Sweden, Aug 11-13, 2004.
- [9] Kim, T.G., Lee, S.B., Lee, H.C. 2010 A Case Study on Engineering Failure Analysis of Link Chain. Safety and Health at Work, Vol. 1, No. 1, 2010.
- [10] Bastid, P., Smith, S.D. 2013 Numerical Analysis of Contact Stresses Between Mooring Chain Links and Potential Consequences for Fatigue Damage, OMAE 2013 Conference, Nantes, France 9-14 juin 2013.

Annexe 1

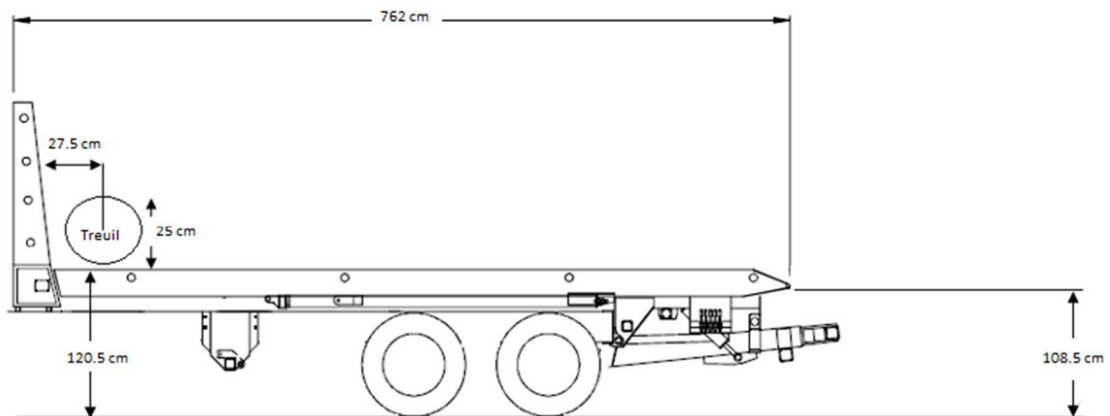
Vue en élévation du camion et du conteneur (source CNESST)



- 1: 707,3 cm
- 2: 615 cm (mesure du câble du treuil déployé lors de l'accident. La mesure 2 a été prise à partir du dessus du treuil (début de la sortie du câble))
- 3: 632,5 cm
- 4: 200,6 cm (mesure à partir du dessus du treuil (câble))
187,5 cm (à partir du centre du treuil)
- 5: 119 cm
- 6: 28 cm

Longueur de la plate-forme : 762 cm

Largeur de la plate-forme : 259 cm



ANNEXE E

Références bibliographiques

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Annual book of ASTM standards 2015. Section 1, iron and steel products. Volume 01.05, steel - bars, forgings, bearing, chain : standard specification for carbon steel chain*. West Conshohocken, Penns., ASTM International, 2015. 4 p. (ASTM A413 / A413M – 07 (2012)).

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. *Slings*, New York, ASME, 2014, xiv, 42, [6] p. (ASME: B30.9-2014).

AMERICAN TOWING AND RECOVERY INSTITUTE. *Home study program*, [En ligne], 2017. [http://www.american towing and recovery institute.org/NEW_Home_Study_Program.html] (Consulté le 5 mai 2016).

APEX CHAIN AND CABLE. *Rigging guide and lifting product*, Brantford, Ont., Apex, [201?], 69 p. [<http://www.apexchain.com/Apex%20Revision%20June%202nd%202015.pdf>].

ASSOCIATION CANADIENNE DE NORMALISATION. *Code of practice for the use and care of chain*, Mississauga, CSA, 1964, 12 p. (CSA B75-1947, Reaffirmed 1964).

BROZYNA. Henry. *Understanding the difference between chain grades and how they're used*, [En ligne], 2015. [<http://blog.cmworks.com/understanding-the-difference-between-chain-grades-and-how-theyre-used/>] (Consulté le 11 avril 2016).

COLUMBUS MCKINNON CORPORATION. *Chain & rigging attachments*, Columbus McKinnon Corporation, 2016, 218 p. [<https://www.cmworks.com/Public/57878/CM%20Rigging%20Product%20Catalog%20CMRP-6-0816-v3.pdf>].

CONSEIL CANADIEN DES ADMINISTRATEURS EN TRANSPORT MOTORISÉ. *Code canadien de sécurité pour les transporteurs routiers. Norme 10 : arrimage des cargaisons*. CCATM, 2013, 48 p. [<http://ccmta.ca/images/pdf-documents-french/cra/NSC-10-June-2013-French.pdf>].

HUMELSINE, Terry R. *The recovery handbook*, Niagara Falls, N.Y., Wreckmaster, 2015, 136 p.

INDUSTRIES LAM-É. *Chaînes*, Industries Lam-é, [201?], [46 p.]. [http://www.lam-e.com/produits/pdf/2.0_chaines.pdf].

INDUSTRIES LAM-É. *Formation en levage : utilisation et vérification des élingues et accessoires*, Québec, Industries Lam-é, 2015, 66 p. [http://www.csst.qc.ca/colloques/saguenay/documents/8-utilisation_et_verification_elingues_de_levage-slavoie.pdf].

KYNEDYNE. *Chain products, hardware & accessories, clevis grab hook: grade 70, 3/8" x 400', Bulk Chain in a Barrel 10038*, [En ligne]. [201?] [<http://www.kinedyne.com/products/341/bulk-chain.html>] (Consulté le 5 avril 2016).

KYNEDYNE. *Chain products, hardware & accessories, clevis grab hook: alloy, grade 70, 3/8" 10038GH*. [En ligne]. [201?] [<http://www.kinedyne.com/products/327/clevis-grab-hook.html>] (Consulté le 5 avril 2016).

KYNEDYNE. *Chain products, hardware & accessories, slip hooks : alloy, grade 70, 3/8" 101-15375*. [En ligne]. [201?] [<http://www.kinedyne.com/products/412/slip-hooks.html#product-list>] (Consulté le 5 avril 2016).

LAFRENIÈRE, L. Bris d'une chaîne de camion lors du chargement d'un conteneur, Trois-Rivières, Centre de Métallurgie du Québec, 26 mai 2016.

NATIONAL ASSOCIATION OF CHAIN MANUFACTURERS. *Welded steel chain specifications*, NACM, 2010, 13 p. [<https://www.nacm.info/specifications/welded-chain-specifications/>].

NATIONAL ASSOCIATION OF CHAIN MANUFACTURERS. *Forged grade 30, grade 43, and grade 70 chain hook specifications*. NACM, 2014, 6 p. [<https://www.nacm.info/specifications/hook-specifications/>].

ORGANISATION INTERNATIONALE DE NORMALISATION. *Conteneurs de la série 1 : manutention et fixation*, Genève, ISO, 1997, iii, 31 p. (ISO: 3874:1997, ISO: 3874:1997/Amd. 1:2000, ISO: 3874:1997/Amd. 2:2002).

ORGANISATION INTERNATIONALE DE NORMALISATION. *Conteneurs pour le transport de marchandise : vocabulaire*, Genève, ISO, 1999, 2, v, 32 p. (ISO: 830:1999 (Confirmée 2011), ISO: 830:1999/Cor. 1:2001).

ORGANISATION INTERNATIONALE DE NORMALISATION. *Conteneurs de la série 1 : spécifications et essais. Partie 1, conteneurs d'usage général pour marchandises diverses*, Genève, ISO, 2013, vi, 31 p. (ISO: 1496-1:2013, ISO: 1496-1:2013/Amd. 1:2016).

QUÉBEC. *Loi concernant les propriétaires, les exploitants et les conducteurs de véhicules lourds : rlrq, chapitre p-30.3, à jour au 1^{er} mars 2017*, [en ligne], 2005 [<http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cs/P-30.3>] (Consulté le 21 avril 2016).

QUÉBEC. *Code de la sécurité routière : RLRQ, chapitre C-24.2, à jour au 1^{er} mars 2017*, [En ligne], 2017 [<http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cs/C-24.2>] (Consulté le 21 avril 2016).

RAMSEY WINCH COMPANY. *Owner's manual: model H-800 series, dow-lok equipped, industrial low-mount winches*, Tulsa, Oklahoma, Ramsey Winch, [201?]. (914164-0305-A).

RUEL, Jean. *Analyse des conditions de chargement d'une chaîne utilisée lors de la manutention d'un conteneur maritime et analyse de méthodes de tirage d'un conteneur sur une plate-forme de remorqueuse*. Québec, 22 septembre 2016.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. *2005 SAE handbook, volume 3 : on-highway vehicles (part II) and off-highway machinery*. Warrendale, Penns., SAE, 2005.

TOWING AND RECOVERY ASSOCIATION OF AMERICA. *2003 traffic incident management tow operator workplan (TIMTOW) guide*. Alexandria, VA, TRAA, [2003], 78 p.

UNITED STATES DEPARTEMENT OF LABOR. OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH ADMINISTRATION. *Sling Safety*. [En ligne]. 1996. [<https://www.osha.gov/Publications/osh3072.html>] (Consulté le 5 avril 2016).

WRECKMASTER. *World of recovery*, Beamsville, Ont., WreckMaster, 2014, 186 p.