

EN004426**RAPPORT D'ENQUÊTE**

Accident ayant causé la mort d'un [REDACTED] de l'entreprise Opération Forestière R. Ménard inc., survenu le 29 mai 2024, chez l'entrepreneur, 9406-1702 Québec inc., situé au 452, route 111, La Corne.

**Service de la prévention-inspection – Abitibi-Témiscamingue
et Nord-du-Québec**

Inspecteur :

Patrick Bourdages, Ing.f.**Inspecteur :**

Guy Rouleau**Date du rapport : 15 janvier 2025**

Rapport distribué à :

- Monsieur Stéphane Gourde, propriétaire, 9406-1702 Québec Inc.
 - Madame B
 - Madame Geneviève Thériault, coroner
 - Docteur Stéphane Trépanier, directeur, Direction de la santé publique de l'Abitibi-Témiscamingue
-

TABLE DES MATIÈRES

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | <u>RÉSUMÉ DU RAPPORT</u> | 1 |
| 2 | <u>ORGANISATION DU TRAVAIL</u> | 3 |
| 2.1 | L'ENTREPRISE 9406-1702 QUÉBEC INC. | 3 |
| 2.1.1 | STRUCTURE GÉNÉRALE DE L'ENTREPRISE | 3 |
| 2.1.2 | GESTION DE LA SANTÉ ET DE LA SÉCURITÉ DU TRAVAIL | 3 |
| 2.2 | L'ENTREPRISE OPÉRATIONS FORESTIÈRES R. MÉNARD INC. | 4 |
| 2.2.1 | STRUCTURE GÉNÉRALE DE L'ENTREPRISE | 4 |
| 2.2.2 | GESTION DE LA SANTÉ ET DE LA SÉCURITÉ DU TRAVAIL DE L'ENTREPRISE | 4 |
| 3 | <u>DESCRIPTION DU TRAVAIL</u> | 5 |
| 3.1 | DESCRIPTION DU LIEU DE TRAVAIL | 5 |
| 3.2 | DESCRIPTION DU TRAVAIL À EFFECTUER | 6 |
| 4 | <u>ACCIDENT : FAITS ET ANALYSE</u> | 7 |
| 4.1 | CHRONOLOGIE DE L'ACCIDENT | 7 |
| 4.2 | CONSTATATIONS ET INFORMATIONS RECUEILLIES | 9 |
| 4.2.1 | ANALYSE DU MANUEL DU FABRICANT KOMATSU POUR L'ABATTEUSE À TÊTE MULTIFONCTIONNELLE VALMET 941 | 9 |
| 4.2.2 | FORMATION | 10 |
| 4.2.3 | LOI, NORMES ET OBSERVATIONS | 11 |
| 4.2.4 | EXPERTISE SUR LE BOULON DE LEVAGE | 12 |
| 4.2.4.1 | Examen visuel du boulon et de la manille | 12 |
| 4.2.4.2 | Examen de la surface de rupture au microscope | 13 |
| 4.2.4.3 | Essais de dureté du boulon | 13 |
| 4.2.4.4 | Calculs mécaniques et simulations | 13 |
| 4.2.4.5 | Conclusions du CMQ | 16 |
| 4.2.5 | ESPACE DE TRAVAIL ET ÉQUIPEMENT DE LEVAGE | 16 |
| 4.2.6 | MÉTHODE DE TRAVAIL | 17 |
| 4.3 | ÉNONCÉS ET ANALYSE DES CAUSES | 18 |
| 4.3.1 | L'ENTREPRENEUR N'A PAS ASSURÉ LA FORMATION DE SON TRAVAILLEUR, AMENANT UNE MAUVAISE MÉTHODE DE LEVAGE QUI ENTRAÎNE LA RUPTURE DU BOULON SERVANT AU LEVAGE DE LA CABINE LORS DES MANIPULATIONS DE CETTE DERNIÈRE. | 18 |
| 4.3.2 | UNE MÉTHODE DE TRAVAIL IMPROVISÉE ET NON CONFORME A ÉTÉ UTILISÉE POUR REMETTRE EN PLACE LA CABINE DE L'ABATTEUSE. | 19 |

| | | |
|---------------------------|---|-----------|
| 5 | <u>CONCLUSION</u> | 20 |
| 5.1 | CAUSES DE L'ACCIDENT | 20 |
| 5.2 | AUTRES DOCUMENTS ÉMIS LORS DE L'ENQUÊTE | 20 |
| 5.3 | SUVIS DE L'ENQUÊTE | 20 |
| <u>ANNEXES</u> | | |
| ANNEXE A : | Liste des accidentés / Accidenté | 21 |
| ANNEXE B : | Liste des personnes interrogées | 22 |
| ANNEXE C : | Références bibliographiques | 23 |
| ANNEXE D : | Rapport d'expertise | 24 |

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

Lors de la remise en place de la cabine d'une abatteuse à tête multifonctionnelle à l'aide d'un pont roulant, le boulon de levage, de fabrication artisanale, se rompt. Ce dernier est vissé au centre sur le toit de la cabine, dans l'orifice prévu à cet effet par le fabricant de l'équipement. Lors de la rupture, la cabine chute sur son assise et bascule sur le côté, frappant et coinçant C contre un des pneus de l'équipement.

Conséquences

C est transporté au centre hospitalier d'Amos où son décès est constaté.



Vue avant



Vue arrière

Figure 1: Lieu de l'accident

Source : CNESST modifiée par la CNESST

Abrégé des causes

L'entrepreneur n'a pas assuré la formation de son travailleur, amenant une mauvaise méthode de levage qui entraîne la rupture du boulon servant au levage de la cabine lors des manipulations de cette dernière.

Une méthode de travail improvisée et non conforme a été utilisée pour remettre en place la cabine de l'abatteuse.

Mesures correctives

Le 29 mai 2024, une décision est émise au niveau de l'équipement pour fins d'enquête. La décision est inscrite au rapport d'intervention RAP1470072.

Le 27 juin 2024, la décision émise le 29 mai 2024 est levée. La décision est inscrite au rapport d'intervention RAP1473651.

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 L'entreprise 9406-1702 Québec Inc.

2.1.1 Structure générale de l'entreprise

L'entreprise 9406-1702 Québec Inc., également appelée Soudure G métal, est nommée comme l'entrepreneur pour le présent rapport. Son président et seul administrateur est monsieur Stéphane Gourde. L'établissement est enregistré au 452, Route 111 à La Corne.

L'activité principale de l'entrepreneur consiste à effectuer des travaux de soudures et de remise à neuf de pièces métalliques (usinage) pour le domaine forestier. Ces travaux nécessitent l'utilisation de machines conventionnelles (tour, fraiseuse, aléuseuse, etc.), de découpeuses (oxycoupage, arc-air, plasma, etc.) et de soudeuses. Par sa spécialisation, l'entrepreneur est appelé à effectuer de la manipulation de pièces lourdes et encombrantes.

La production s'effectue à petite échelle. L'entreprise, en excluant le propriétaire, comprend deux travailleurs lors de l'intervention. Au moment de l'événement, l'entrepreneur permet la participation des travailleurs en provenance de l'employeur Opérations Forestières R. Ménard Inc., afin d'effectuer des travaux spécifiques.

2.1.2 Gestion de la santé et de la sécurité du travail

La gestion de la santé et de la sécurité dans l'établissement n'est aucunement documentée donc aucun programme de prévention ou de formation n'est existant. L'entrepreneur œuvre dans le secteur d'activité économique *Industries manufacturières diverses*.

L'entrepreneur ne présente aucune structure établie en ce qui a trait à la santé et la sécurité du travail. Des réunions de sécurité informelles ont lieu toutes les deux semaines selon l'entrepreneur, mais puisqu'elles ne sont pas documentées, aucune démonstration ne peut être fournie. Aucun mécanisme de participation n'est présent à l'intérieur de l'entreprise. Les consignes ainsi que les mesures de sécurité sont données verbalement lors de l'exécution des tâches particulières.

Seul un compagnonnage est prévu pour la formation des travailleurs. Aucun document de formation n'est présent au moment de l'événement. Les travailleurs ne sont pas formés par l'employeur sur l'utilisation du pont roulant, sur les procédés de soudage ou la maîtrise des énergies.

2.2 L'entreprise Opérations Forestières R. Ménard Inc.

2.2.1 Structure générale de l'entreprise

L'entreprise Opérations Forestières R. Ménard Inc., est une entreprise qui se spécialise depuis 2005 dans le domaine des opérations de coupe forestière. L'entreprise ne possède qu'un seul dirigeant, soit le président et secrétaire, M. Robert Ménard. ■■■■■

■■■■■ L'entreprise possède de la machinerie forestière, dont une abatteuse à tête multifonctionnelle.

2.2.2 Gestion de la santé et de la sécurité du travail de l'entreprise

L'entreprise Opérations Forestières R. Ménard Inc. œuvre dans le secteur d'activité économique *Forêt et scierie*. Elle ne présente aucune structure en ce qui a trait à la santé et la sécurité du travail. Aucun mécanisme de participation n'est présent à l'intérieur de l'entreprise à l'exception de réunions informelles selon les besoins. Les consignes ainsi que les mesures de sécurité sont données verbalement. L'entreprise travaille exclusivement pour un employeur en sylviculture. Les réunions de sécurité annuelles sont gérées par cet employeur. Le programme de prévention auquel l'entreprise adhère est celui de cet employeur. L'entreprise n'a aucun programme de prévention en place officiellement malgré ses obligations en vertu de son secteur d'activité.

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

L'établissement où s'effectue le travail abrite, un local administratif, l'atelier d'usinage ainsi qu'un atelier mécanique. Ce dernier est pourvu d'un pont roulant d'une capacité de trois tonnes. L'accident survient dans l'atelier mécanique, sous le pont roulant, tel que présenté à la figure 2. L'accès s'effectue par l'entremise d'une porte de garage ainsi que par deux portes d'homme; la première en façade du bâtiment et la seconde du côté nord.

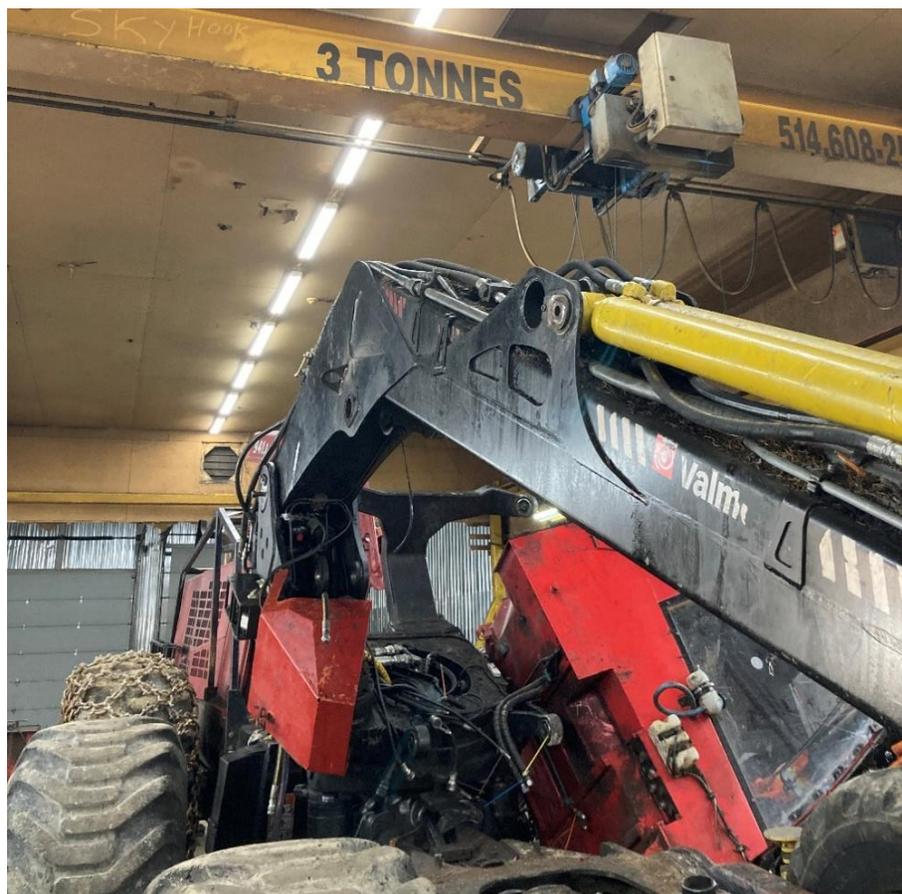


Fig. 2 : *Lieu de travail (atelier mécanique)*

Source : CNESST

3.2 Description du travail à effectuer

L'abatteuse à tête multifonctionnelle est en réparation dans l'atelier depuis deux à trois semaines. La cabine doit être retirée afin de donner accès à certaines composantes. Le jour de l'accident, les réparations étant déjà effectuées, les travailleurs s'affairent à remettre la cabine en place. Pour ce faire, quatre travailleurs effectuent les tâches suivantes :

- Un travailleur de l'entrepreneur utilise le pont roulant pour réaliser les manœuvres de levage de la cabine. Ce dernier est positionné à gauche de l'abatteuse au niveau du pneu arrière;
- Un travailleur du propriétaire est positionné sur l'abatteuse derrière l'assise de la cabine afin d'orienter celle-ci en utilisant deux palans à chaîne pour faciliter les manœuvres;
- **C** se situe sur le côté gauche de l'abatteuse, entre les roues, afin de diriger les manœuvres et d'ajouter les goupilles de fixation éventuellement;
- Finalement, un deuxième travailleur du propriétaire est positionné au sol, devant l'abatteuse, afin d'orienter la cabine.

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

Le matin du 29 avril 2024, l'équipe de l'entrepreneur s'affaire à réinstaller une cabine d'abatteuse à tête multifonctionnelle. Pour ce faire, C supervise les travaux de réinstallation à la suite d'un entretien de cette dernière, à l'intérieur du garage de l'entrepreneur. C est à proximité de l'équipement lors du levage de la cabine. Ce dernier est positionné à gauche de l'équipement près de la roue arrière.

Vers 9 h 00, la cabine est levée par le travailleur de l'entrepreneur à l'aide du pont roulant. Pour ce faire, un boulon est soudé à une manille et vissé dans le toit de la cabine dans un emplacement prévu par le fabricant et présent d'origine sur la cabine. La manille est par la suite placée sur la pointe du crochet du pont roulant, tel que présenté à la figure 3. Le bas de la cabine est guidé à l'aide de deux palans à chaîne fixés sur des points d'ancrage existants, positionnés sur les coins inférieurs de cette dernière, sous le niveau des fenêtres, tel que présenté à la figure 4.



Fig. 3 : Manille placée sur la pointe du crochet du pont roulant

Source : Sûreté du Québec

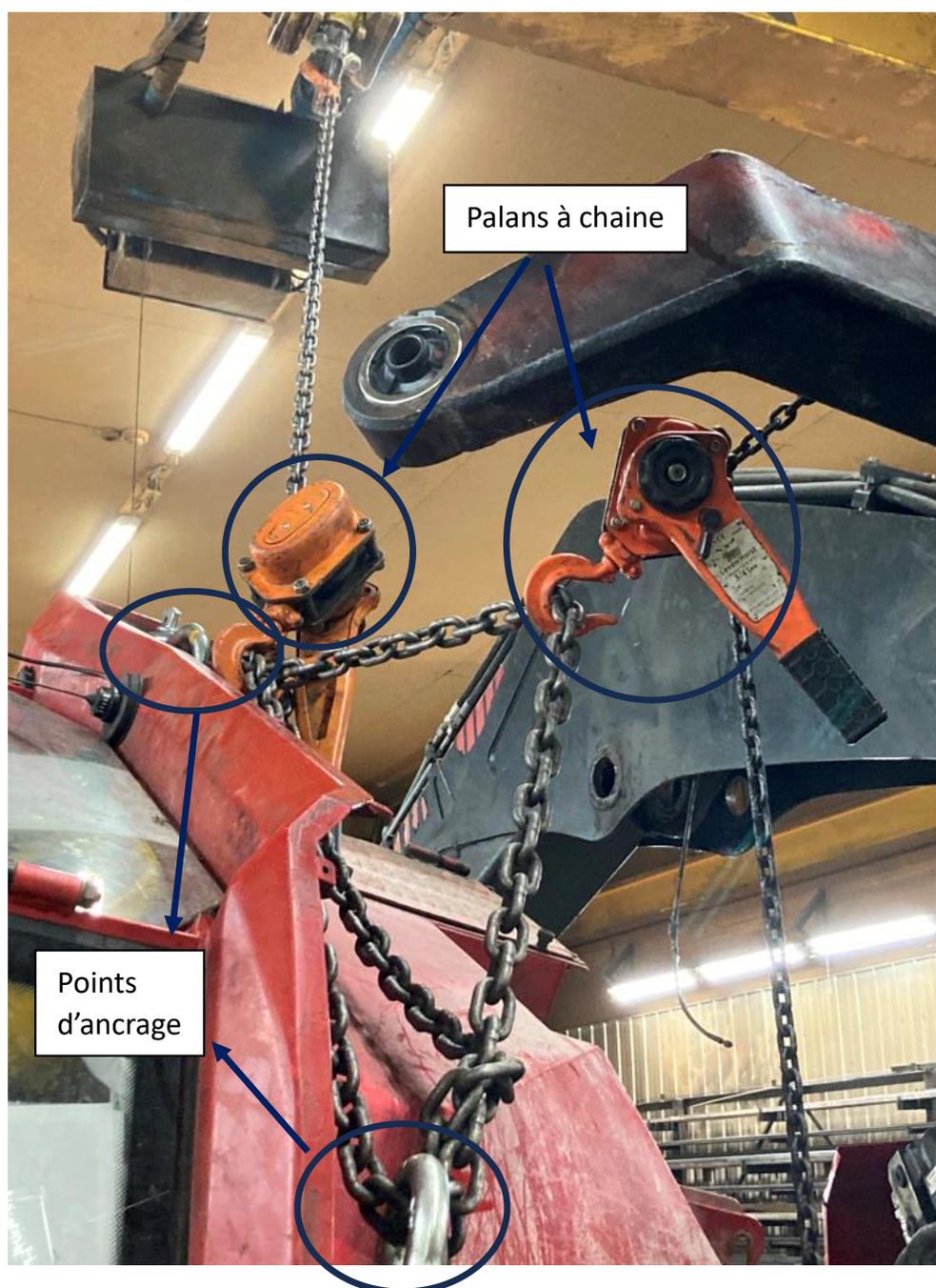


Fig. 4 : Points d'ancrage pour positionner la cabine avec les palans à chaîne

Source : CNESST

Afin d'abaisser le devant de l'abatteuse, les pneus arrière du tandem sont retirés et les pneus avant sont dégonflés.

Vers 9 h 15, pour permettre le positionnement de la cabine dans les points de pivot avant, cette dernière est légèrement inclinée. Pour ce faire, l'opérateur du pont roulant positionne celui-ci légèrement devant la position de repos prévue de la cabine, tel que présenté à la figure 5. Un travailleur du propriétaire positionné sur l'équipement, derrière la cabine, exerce une traction vers

l'arrière de l'équipement à l'aide de deux palans à chaîne. À ce moment, le boulon situé sur le dessus de la cabine se rompt.



Fig. 5 : Positionnement sur les points de pivots avant

Source : CNESST

Vers 9 h 30, lors de la rupture du boulon, la cabine tombe sur l'équipement et bascule vers la gauche en effectuant une rotation sur son axe principal d'approximativement 75° en sens antihoraire. Par la suite, la cabine frappe **C** au haut du corps et le coince contre un pneu de l'équipement qui avait été démantelé pour faciliter les travaux.

4.2 Constatations et informations recueillies

4.2.1 Analyse du manuel du fabricant Komatsu pour l'abatteuse à tête multifonctionnelle Valmet 941

La section 50 « désassemblage et assemblage » du manuel du fabricant Komatsu pour l'équipement 931XC, explique la méthode appropriée pour assembler et désassembler la cabine. La méthode prévoit d'utiliser deux points d'ancrage ainsi que deux boulons à œil munis de manilles, tel que présenté à la figure 6. Ces manilles sont accrochées à une barre de distribution de charge qui est ensuite suspendue à un crochet de chaîne ou directement au pont roulant. La représentante du manufacturier confirme que la procédure est identique pour l'équipement 941 impliqué dans l'accident à l'exception que le 931XC utilise deux points d'ancrage sur le toit de la cabine au lieu d'un seul comme sur le modèle 941 impliqué dans l'accident.

La procédure inscrite au document du fabricant « 50 Disassembly and assembly Cab Harvesters 931XC » à la section 1.23, aux pages 92 à 99, spécifie également que le démontage et le montage doivent être effectués par un concessionnaire autorisé et représentant Komatsu uniquement.



Fig. 6 : Boulon d'ancrage avec manille
Source : manuel du fabricant Komatsu

Dans le document « workshop instruction » fourni par le manufacturier, on peut lire entre autres, les éléments suivants :

- *Ne pas s'approcher des charges suspendues;*
- *S'assurer d'avoir les permis requis, qualifications ou entraînements nécessaires à la tâche;*
- *Suivre les méthodes recommandées lors de l'installation ou la désinstallation de composantes;*
- *Utiliser les équipements de levage spécialisés si les instructions du fabricant le requièrent;*
- *Lors du levage, utiliser le boulon à œil spécifié et attacher le système de levage au boulon à œil à l'aide d'une manille;*
- *Ne pas utiliser de crochets qui n'ont pas de linguet de sécurité fonctionnel;*
- *La force maximale d'un crochet se situe au fond de ce dernier;*
- *Ne pas lever une charge à angle.*

4.2.2 Formation

Selon les témoignages recueillis :

- **D** ne détient pas de formation par une école de métier ou tout autre organisme lui conférant une compétence en soudure. Ce dernier effectue des travaux de soudage depuis plusieurs années sans les formations requises. La manille est soudée sur le boulon fourni par **C**.

- **D** n'a jamais reçu de formation par un organisme reconnu ou par l'entrepreneur au niveau de l'opération du pont roulant installé dans l'atelier de l'entrepreneur.

Selon la *Loi sur la santé et la sécurité du travail* à l'article 51, alinéa 9, l'employeur doit assurer la formation et la supervision de son travailleur.

4.2.3 Loi, normes et observations

Selon la *Loi sur la santé et la sécurité du travail*, à l'article 51 :

L'employeur doit prendre les mesures nécessaires pour protéger la santé et assurer la sécurité et l'intégrité physique et psychique du travailleur. Il doit notamment:

[...]

3° *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;*

[...]

9° *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.*

Selon la norme ASME B30.26-2015¹ « matériel de gréage » à la section 26-1.8 « inspection, réparation et retrait », il est inscrit qu'avec la présence des indicateurs suivants, la pièce d'équipement doit être retirée du service :

- *26-1.8.5 critères de retrait :*
 - b) *Indications de dommages par la chaleur, incluant éclats de soudure ou éclats d'arc;*
- *26-1.8.6 réparations et modifications :*
 - a) *réparations, altérations ou modifications doivent être spécifiées par le fabricant du matériel ou par une personne qualifiée.*

La manille présente des marques de soudure. Le boulon présente des marques de dommage par la chaleur. Des modifications ont été faites à ces éléments. Nous n'avons pu obtenir de démonstration que le fabricant a autorisé la modification de ces équipements de gréage.

Selon la norme ASME B30.16-2022 « palans suspendus et fixes » à la section 16-3.3.2 « instructions générales à suivre lors de l'opération du palan », nous retrouvons les éléments suivants :

- *g) la charge, élingue ou l'équipement de levage doit être positionné dans le fond du crochet du palan (gorge);*
- [...]

¹ Les paragraphes des normes ASME B30.26-2015 et ASME B30.16-2022 sont des traductions libres des auteurs.

- *i) le personnel ne doit pas rester près des charges suspendues;*
- *[...]*
- *k) le palan doit être utilisé pour lever des charges de façon verticale sans tirer sur la charge latéralement sauf, si c'est spécifiquement autorisé par le manufacturier ou par une personne qualifiée pour l'équipement et une personne qualifiée pour la structure qui supporte le pont roulant.*

Selon les photographies prises sur les lieux, la forme du boulon reconstitué après sa rupture, la position du **C** et de **D**, ces trois critères ne sont pas respectés lors de l'accident.

4.2.4 Expertise sur le boulon de levage

Afin de déterminer la cause de la rupture du boulon soutenant la cabine, une demande d'expertise a été soumise auprès du Centre de métallurgie du Québec (CMQ). Cette expertise a utilisé diverses méthodes pour déterminer le type de boulon utilisé et définir la cause de la rupture de ce dernier.

À la suite de ces examens et essais, des simulations et calculs mécaniques ont été effectués pour déterminer la charge de rupture appliquée sur le boulon.

Le boulon fourni par **C** a une longueur supérieure de 1.1 cm à la profondeur du trou disponible sur le toit de la cabine de l'équipement.

La forme du boulon reconstitué après l'accident démontre que ce dernier a subi une force de traction latérale jusqu'à sa rupture, durant la remise en place de la cabine sur l'équipement. La figure 7 démontre l'angle de rupture.



Fig. 7 : Boulon reconstitué après l'accident
Source : CNESST modifié par le CMQ

4.2.4.1 Examen visuel du boulon et de la manille

La soudure entre les deux éléments n'est pas déformée et est visuellement adéquate.

La fissure s'est amorcée au fond du filet qui était situé directement au niveau de la surface de la cabine.

Les filets du boulon sont étirés dans un cadran et comprimés à 180°, ce qui indique qu'il s'est brisé sous l'effet d'une force de flexion.

4.2.4.2 Examen de la surface de rupture au microscope

La surface de rupture du boulon est recouverte de cupules de ductilité², autant du côté en tension du boulon que du côté en compression, ce qui prouve que le boulon s'est brisé à la suite d'un déchirement lent de l'acier.

La zone d'arrachement final présente un profil de rupture transgranulaire³, ce qui caractérise un bris soudain. Il est normal que cette zone se brise rapidement, car toute la charge est appliquée sur la toute petite section restante, raison pour laquelle la contrainte ressentie est extrêmement élevée et que la fissure se propage très rapidement.

4.2.4.3 Essais de dureté du boulon

Des essais de microdureté Vickers⁴ furent effectués à plusieurs endroits sur la section filetée du boulon et les résultats ont donné une dureté très stable de 37,4 HRC⁵.

Des essais de microdureté Vickers ont été effectués à proximité de la tête et au cœur, sur le morceau ayant été soudé à la manille. La tête du boulon présentait une dureté moyenne de 31,6 HRC, ce qui signifie que la chaleur de la soudure a réduit la dureté de l'acier à cet endroit. Cependant, les duretés prises à mi-chemin entre la tête et la surface de rupture ont donné une dureté moyenne de 37,5 HRC, ce qui indique que la zone affectée par la soudure se limite à la tête du boulon et que la zone de rupture n'a pas été affectée. Autrement dit, la soudure n'a pas contribué au bris du boulon.

À la suite des essais de dureté du boulon, une estimation du grade du boulon a été faite par le CMQ. Étant donné la résistance ultime de 793 MPa, le boulon est confirmé de grade 4.8 selon la norme ISO898 caractéristiques mécaniques des éléments de fixation en acier au carbone et en acier allié.

4.2.4.4 Calculs mécaniques et simulations

Dans un premier scénario qui considère la situation constatée lors de l'enquête, le CMQ simule les contraintes appliquées au boulon alors que la tête de ce dernier n'est pas totalement appuyée sur la cabine (espacement de 1.1 cm) avec la charge de la cabine définie à 1100 kg. Ce scénario évalue

² Creux microscopiques observés sur la surface de rupture d'un matériau à la suite d'un bris ductile

³ Bris fragile (sans déformation) et rapide dans lequel la fissure passe au travers des grains (transgranulaire)

⁴ Méthode pour prendre des mesures de dureté d'un matériau

⁵ Échelle de dureté en Rockwell C

une charge pleinement verticale et par la suite une charge latérale appliquée lorsque les travailleurs ont incliné la cabine pour la fixer en place. La position verticale applique une charge en tension qui amène une contrainte de 370 MPa sur le boulon, tel que présenté à la figure 8. Cette charge ne dépasse pas la limite de capacité du boulon.

Dès que la charge est appliquée avec un angle, l'effet de flexion sur le boulon engendre une contrainte très importante au fond des filets du boulon à la jonction du toit de la cabine. La résistance ultime en traction pour le boulon est rapidement surpassée. Les calculs du CMQ démontrent qu'avec l'angle de rupture du boulon de 21°, la contrainte sur le boulon a atteint plus de 4172 MPa, tel que présenté à la figure 9, ce qui représente plus de 5 fois la résistance ultime du boulon. La limite de résistance du boulon a été atteinte à un angle de 2° d'inclinaison de la cabine.

Le deuxième scénario considère les mêmes calculs, mais dans une situation où le boulon a la longueur adéquate et dont la tête est pleinement appuyée sur la cabine. Cet appui complet diminue grandement l'effet de flexion appliqué sur le boulon. Toutefois, la limite de résistance du boulon aurait été dépassée à un angle de 25°. Ce scénario est présenté à la figure 10.

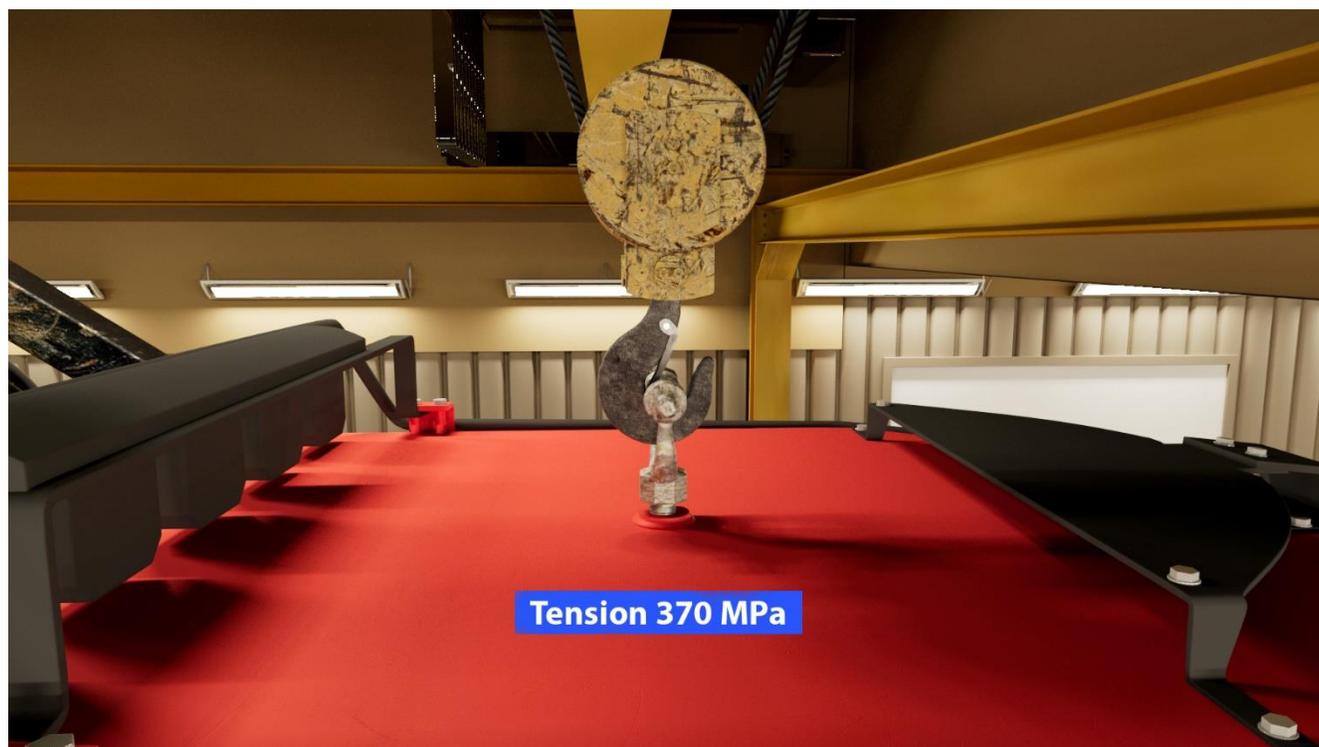


Fig. 8 : Simulation virtuelle de la tension verticale sur le boulon non appuyé sur la cabine

Source : CNESST

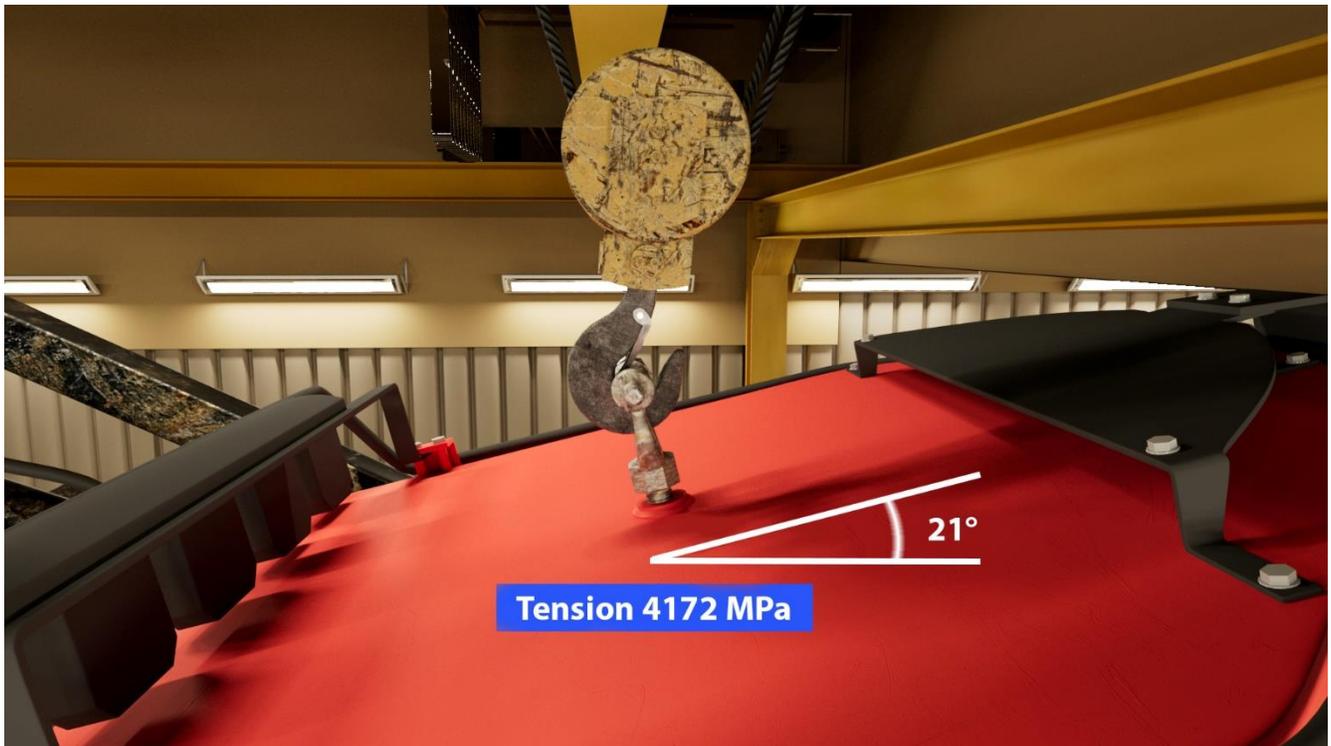


Fig. 9 : Simulation virtuelle de la tension à angle sur le boulon non appuyé sur la cabine
Source : CNESST

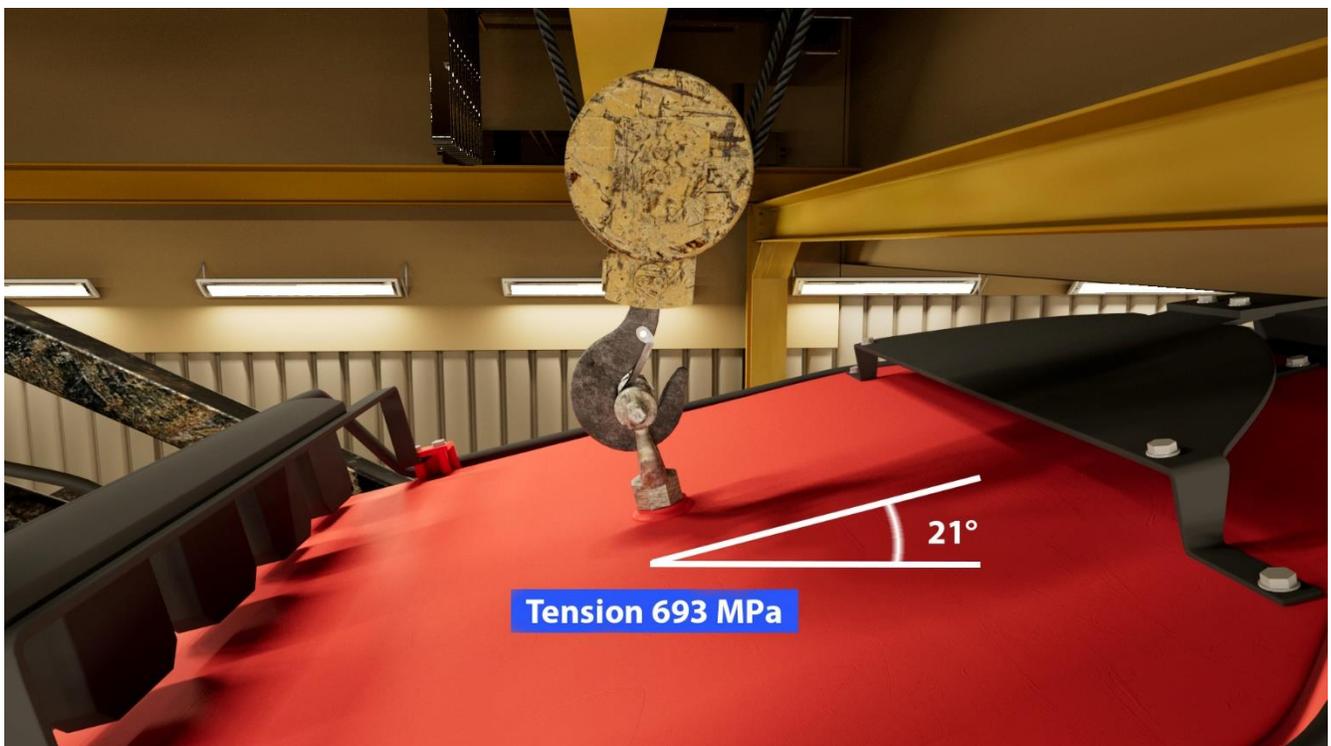


Fig. 10 : Simulation virtuelle de tension à angle sur le boulon appuyé sur la cabine
Source : CNESST

4.2.4.5 Conclusions du CMQ

- L'aspect visuel du boulon, particulièrement les filets étirés dans un cadran et comprimés dans l'autre, confirme qu'il s'est brisé sous l'effet d'une force en flexion;
- La longueur excessive du boulon a grandement augmenté l'effet de flexion et la contrainte ressentie;
- Les essais de microdureté Vickers ont permis de prouver que la soudure de la manille sur le boulon n'a pas contribué au bris, car la zone affectée par la soudure se limitait à la tête du boulon;
- Les simulations ont démontré que le boulon aurait été sollicité à sa limite de capacité même si la longueur avait été respectée et que sa tête avait été appuyée sur la cabine, étant donné la charge de traction induite lors du positionnement de la cabine.

4.2.5 Espace de travail et équipement de levage

Dans l'atelier de l'entrepreneur, l'espace au sol pour circuler est supérieur à 1 m tout le tour de l'abatteuse, malgré la présence de celle-ci. Le mât de cette dernière est étendu vers l'avant de l'équipement et la tête d'abattage est enlevée lors de la maintenance. Toutefois, étant donné une hauteur limitée sous le palan, le groupe a convenu de retirer les pneus arrière du tandem et de dégonfler les pneus avant afin d'abaisser le devant de l'abatteuse pour faciliter la réinstallation de la cabine. La figure 11 clarifie les éléments mentionnés plus haut.



*Fig. 11 : Abatteuse à tête multifonctionnelle Valmet 941 du manufacturier Komatsu
Cette abatteuse n'est pas celle impliquée dans l'accident
Source : Équipement SMS, Commentaires CNESST*

Lors des travaux, le câble sur le palan du pont roulant est enroulé presque en totalité, tel qu'en témoigne la figure 12.

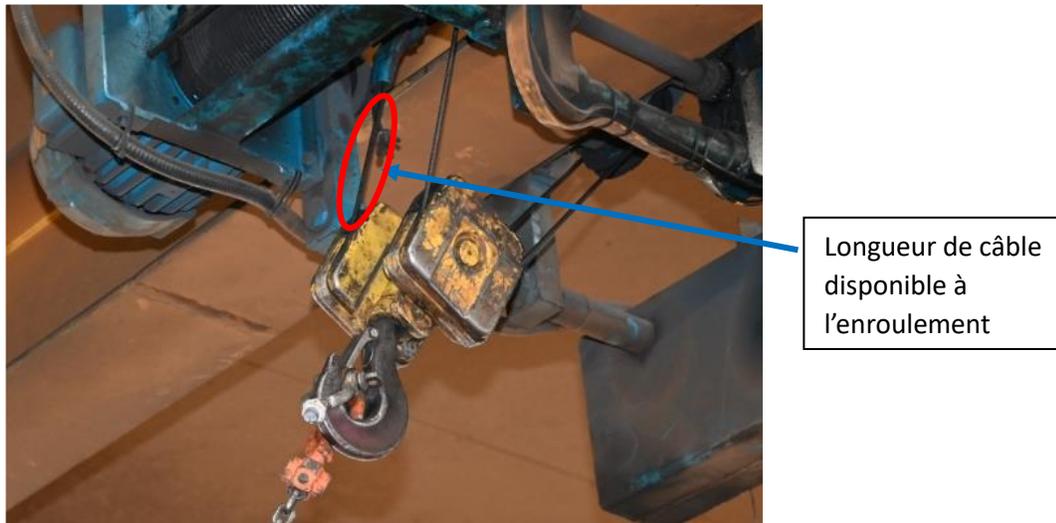


Fig. 12 : Enroulement de câble sur le palan du pont roulant
Source : Sûreté du Québec modifiée par la CNESST

Étant donné l'enroulement presque complet du câble sur le palan, le jeu longitudinal pour positionner la cabine dans ses points d'ancrage est très limité. La position inadéquate de la manille est due au fait qu'elle est trop petite pour s'insérer complètement dans le crochet en plus de la présence d'un crochet de palan au fond de la gorge du crochet du pont roulant. Le crochet du palan à chaîne au fond de la gorge du crochet du pont roulant est trop petit pour permettre au linguet de sécurité de ce dernier de se refermer.

4.2.6 Méthode de travail

Selon l'information recueillie lors de l'enquête, ce n'est pas la première fois que ■ C ■ participe à la réinstallation d'une cabine d'abatteuse. C ■ dirige les travaux de remontage sur son abatteuse à la suite d'une analyse de la tâche à effectuer. Aucun membre de l'équipe n'a identifié un risque de rupture lors des manœuvres.

Aucun manuel du fabricant n'est disponible par l'entrepreneur ou par les travailleurs du propriétaire sur les lieux de l'accident. Les travailleurs présents improvisent une méthode de travail qui leur semble sécuritaire pour remettre en place la cabine de l'abatteuse.

Cette méthode improvisée implique l'utilisation de deux palans à chaîne pour tirer sur le bas de la cabine afin d'incliner et d'orienter cette dernière et ainsi faciliter l'insertion des boulons dans les points de pivots avant, tel que présenté à la figure 5. Les chaînes de positionnement sous tension induisent la rotation de la cabine lors du mouvement incontrôlé de cette dernière à la suite de la rupture du boulon de levage.

Selon la *Loi sur la Santé et la Sécurité du Travail* à l'article 51, alinéa 3, l'employeur doit s'assurer que les méthodes et techniques utilisées sont sécuritaires.

4.3 Énoncés et analyse des causes

4.3.1 L'entrepreneur n'a pas assuré la formation de son travailleur, amenant une mauvaise méthode de levage qui entraîne la rupture du boulon servant au levage de la cabine lors des manipulations de cette dernière.

C ne dispose pas d'un boulon prescrit par le manufacturier pour soulever la cabine de l'abatteuse. Il demande donc à D d'assembler une manille sur un boulon gradé. Le soudage sur un équipement de levage (la manille) n'est pas autorisé selon la norme ASME B30.26 2015, à moins d'être autorisé par le manufacturier de l'équipement ou une personne qualifiée. Lors de l'événement, C ne détient pas d'autorisation du manufacturier et D n'est pas certifié par un organisme reconnu.

Le boulon improvisé, ainsi créé, est trop long. En effet, la tête du boulon ne peut s'appuyer sur l'épaulement du toit de la cabine, car l'extrémité du boulon atteint le fond de l'orifice avant que la tête ne puisse s'appuyer contre l'épaulement. L'espace de 1.1 cm restant entre l'épaulement du toit de la cabine et la tête du boulon, crée une zone de faiblesse sur cette section du boulon lors de la traction latérale de la cabine.

L'expertise démontre que lorsque la charge est appliquée avec un angle, l'effet de flexion sur le boulon engendre une contrainte très importante au fond du filet du boulon à la jonction du toit de la cabine. La résistance ultime en traction pour le boulon est rapidement surpassée. Les calculs indiquent qu'avec l'angle de rupture de 21°, la contrainte sur le boulon a atteint plus de 4172 MPa, ce qui représente plus de 5 fois la résistance ultime du boulon. Ce dernier se rupture et entraîne la chute puis le basculement de la cabine. L'application de la charge en angle s'est produite parce que les travailleurs ont tiré sur le bas de la cabine lors de sa remise en place, entraînant un déplacement du centre de gravité en dehors de l'axe vertical du pont roulant et une charge de traction latérale sur le boulon vissé sur le dessus de la cabine. Cette méthode de travail n'est pas permise selon la norme ASME B30.16-2022, mais le travailleur qui opère le pont roulant l'ignore, car il n'est pas formé sur l'utilisation des méthodes de levage adéquate à l'aide d'un palan.

C'est la responsabilité de l'entrepreneur de s'assurer que les travailleurs sont adéquatement formés pour effectuer le travail qu'on leur demande de façon sécuritaire et de s'assurer que la méthode de travail utilisée est sécuritaire, ce qui n'a pas été fait lors de l'événement. En effet, ce sont donc les qualifications incomplètes du D qui ont amené l'équipe de travail à utiliser des méthodes de travail contraires aux règles de l'art, soit la création et l'utilisation d'un boulon trop long et l'application d'une charge en angle, ce qui entraîne la rupture du boulon et la chute de la cabine.

Cette cause est retenue.

4.3.2 Une méthode de travail improvisée et non conforme a été utilisée pour remettre en place la cabine de l'abatteuse.

Étant donné que l'entrepreneur n'est pas un concessionnaire autorisé par le fabricant, tel que prescrit par le manuel du fabricant identifié « 50 Disassembly and assembly Cab Harvesters 931XC » à la section 1.23, aux pages 92 à 99, et que le fabricant confirme que le montage et démontage est identique pour le modèle 941.

Étant donné que la hauteur de l'atelier ne permet pas un levage parfaitement vertical de la cabine, l'équipe sur place a effectué les manœuvres suivantes pour permettre la remise en place de la cabine :

- Enlever deux pneus et dégonfler deux autres pour abaisser le devant de l'équipement;
- Incliner l'assise de la cabine;
- Positionner le pont roulant devant la position de repos de la cabine sur l'équipement pour en permettre son inclinaison;
- Installer des palans à chaîne pour pouvoir tirer sur le bas de la cabine pour en permettre l'inclinaison.

Certaines de ces manœuvres sont contraires aux règles de l'art en levage de matériel avec un pont roulant.

Nous pouvons donc conclure qu'une méthode de travail inappropriée a été utilisée pour remettre en place la cabine de l'abatteuse.

Cette cause est retenue.

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

L'entrepreneur n'a pas assuré la formation de son travailleur, amenant une mauvaise méthode de levage qui entraîne la rupture du boulon servant au levage de la cabine lors des manipulations de cette dernière.

Une méthode de travail improvisée et non conforme a été utilisée pour remettre en place la cabine de l'abatteuse.

5.2 Autres documents émis lors de l'enquête

Le 29 mai 2024, une décision est émise au niveau de l'équipement pour fins d'enquête. La décision est inscrite au rapport d'intervention RAP1470072.

Le 27 juin 2024, la décision émise le 29 mai 2024 est levée. La décision est inscrite au rapport d'intervention RAP1473651.

5.3 Suivis de l'enquête

Afin d'informer les milieux de travail et pour éviter que ce genre d'accident ne se reproduise, la CNESST transmettra les conclusions de son enquête aux associations sectorielles paritaires, au comité paritaire de prévention du secteur forêt, ainsi qu'à tous les gestionnaires de mutuelles de prévention.

De plus, afin de sensibiliser les futurs travailleurs et travailleuses, le rapport d'enquête sera acheminé au ministère de l'Éducation du Québec qui en assurera la diffusion dans les établissements offrant les programmes de formation en mécanique d'engins de chantier et mécanique de véhicules lourds routiers.

ANNEXE A**Accidenté**

Nom, prénom : C [REDACTED]

Sexe : Masculin

Âge : [REDACTED]

Fonction habituelle : [REDACTED]

Fonction lors de l'accident : [REDACTED]

Expérience dans cette fonction : [REDACTED]

Ancienneté chez l'employeur : [REDACTED]

Syndicat : Non

ANNEXE B**Liste des personnes interrogées**

Monsieur A [REDACTED] pour 9406-1702 Québec inc.
Monsieur D [REDACTED] pour 9406-1702 Québec inc.
Monsieur F [REDACTED] pour Opération Forestière Robert Ménard
Monsieur G [REDACTED] pour Opération Forestière Robert Ménard
Madame B [REDACTED]

ANNEXE C**Références bibliographiques**

- Extraits du manuel du fabricant
 - o 03-UN GB-B45
 - o 50 disassembly and assembly cab harvesters 931XC (1.23)
- Forarhandbok 941
- Owners manual Valmet 941 Maintenance and inspection
- Svetsinstruktioner (1.1)
- WI00041 Rev 3 General workshop instruction
- WI00560 Rev 1 Replacement - Tilt Cylinders – Harvester
- WI00635 damage assessment of cabin protection systems
- Norme ASME B30.26-2015
- Norme ASME B30.16-2022
- *Loi sur la santé et la sécurité du travail*

ANNEXE D

Rapport d'expertise

Entreprise certifiée ISO 9001:2015

3095, Rue Westinghouse
Parc Industriel Des Hautes-Forges
Trois-Rivières (Québec) G9A 5E1

Téléphone : 819 376-8707
Télécopieur : 819 376-0229

Quebec Metallurgy Center



Analyse de défaillance d'un boulon soudé à une manille

Mme Isabelle Émond
Coordonnatrice Réseau d'expertise et du Soutien-Conseil

CNESST
1199 rue de Bleury, 3^e étage
Montréal, QC
H3B 3J1

Bon de commande : soumission signée
Dossier CMQ : 721-23-100

Préparé par :
Luc Lafrenière, ing.
Pierrick Cyrenne, CPI
Philippe Vachon-Joannette, CPI
Caroline Turgeon, techn.
Myriam Rousseau-Doray, techn.

4 septembre 2024

Le CMQ est certifié ISO 9001:2015 et accrédité ISO 17025:2017 selon

<https://www.scc.ca/fr/accreditation/laboratories/laboratoire-du-centre-de-metallurgie-du-quebec-cmq>

AQ-025F DOCK

Date de modification : 2021-04-22

cmqtr.qc.ca

Projet n° 721-23-100



Résumé

La CNESST a récemment requis les services d'expertise du CMQ afin d'identifier la cause à l'origine du bris d'un boulon qui avait été soudé à une manille et mené au basculement d'une cabine d'abatteuse, causant la mort d'un travailleur.

À la suite de nos observations, essais et simulations, nous sommes d'avis que le boulon s'est brisé à cause de l'effet de flexion engendré par l'angle de chargement de la cabine par rapport à l'axe vertical (axe du boulon).

Projet n° 721-23-100



Table des matières

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introduction | 4 |
| 2 | Méthodologie | 7 |
| 3 | Résultats de laboratoire | 7 |
| 3.1 | L'analyse chimique du boulon brisé..... | 7 |
| 3.2 | L'examen visuel du boulon brisé et de la manille | 8 |
| 3.3 | L'examen métallographique du boulon | 12 |
| 3.4 | L'examen de la surface de rupture au microscope..... | 16 |
| 3.5 | Les essais de dureté | 18 |
| 4 | Calculs mécaniques et simulations | 20 |
| 5 | Discussion | 23 |
| 6 | Conclusion | 25 |
| | Annexe A | 26 |
| | Annexe B | 29 |

Projet n° 721-23-100

Quebec Metallurgy Center
CMQ
Centre de métallurgie du Québec

1 Introduction

La CNESST a récemment requis les services d'expertise du CMQ à la suite du bris d'un boulon soudé à une manille (photo 1) qui a entraîné le basculement de la cabine d'une abatteuse (photo 2) sur un travailleur, causant sa mort.

La gaine pour visser un boulon sur la cabine était prévue par le manufacturier (photos 3), mais le boulon en cause aurait été fourni par C et aucune information (grade du boulon, provenance) n'était disponible. De plus, ce dernier était trop long de 11 mm (selon la CNESST) et sa tête n'était pas appuyée sur la cabine.

Puisque le plafond de la bâtisse n'était pas assez haut pour permettre à l'opérateur de monter et de descendre la cabine verticalement, des actions ont été prises pour la tirer angulairement (photos 4). Un cric hydraulique aurait été utilisé pour incliner la structure de l'équipement (photo 5) et le pont roulant aurait été placé légèrement devant l'abatteuse. Selon les informations reçues, la cabine de l'abatteuse aurait été soulevée pour effectuer des opérations de maintenance en utilisant le boulon à l'étude, et le bris se serait produit lors de la remise en place de la cabine.



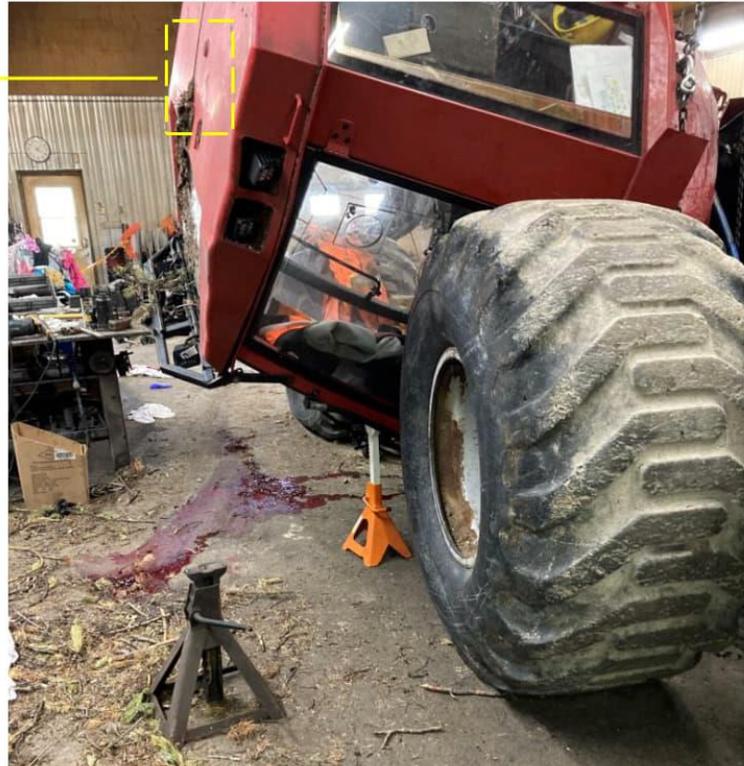
*Photo 1. Boulon brisé à l'étude
Photo fournie par la CNESST*



Photo 2. La cabine de l'abatteuse a basculé après le bris du boulon - Photo fournie par la CNESST

Projet n° 721-23-100

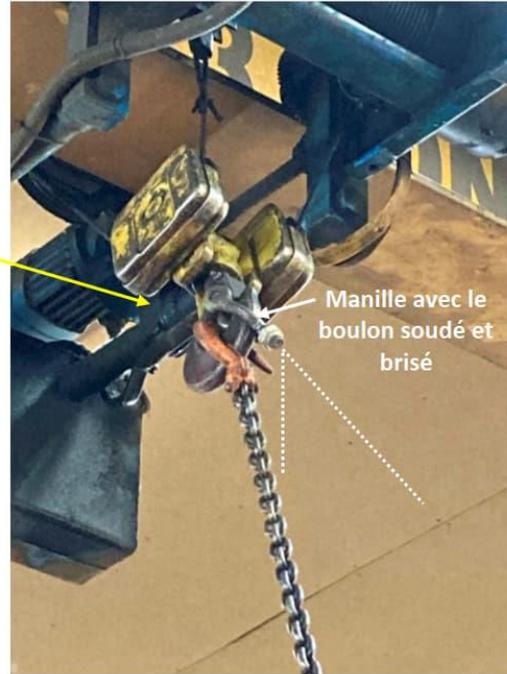
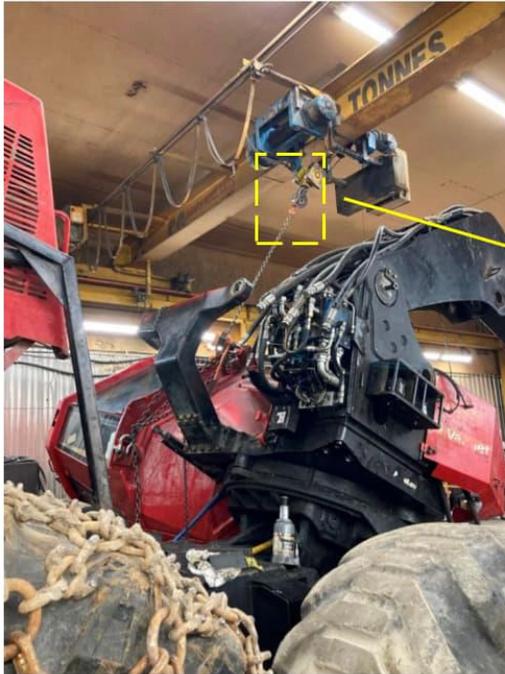
Quebec Metallurgy Center
CMQ
Centre de métallurgie du Québec



*Photos 3. La gaine pour visser le boulon dans la cabine était prévue par le manufacturier
La section filetée du boulon brisé (réf. photo 1) est toujours dans la gaine (flèche blanche)
Photos fournies par la CNESST*

Projet n° 721-23-100

Quebec Metallurgy Center
CMQ
Centre de métallurgie du Québec



*Photos 4. La cabine avait été levée et descendue avec un angle (imagé par les lignes pointillées blanches)
Photos fournies par la CNESST*



Photo 5. Un cric hydraulique avait été utilisé pour incliner une partie de l'abatteuse

Projet n° 721-23-100



2 Méthodologie

Six techniques d'analyse furent utilisées pour identifier la cause à l'origine du bris, soit : une analyse chimique de l'acier du boulon, un examen visuel détaillé du boulon brisé et de la manille, des examens métallographiques, des examens microscopiques, des essais de dureté et des simulations par éléments finis.

3 Résultats de laboratoire

3.1 L'analyse chimique du boulon brisé

L'analyse chimique par spectrométrie optique d'une section du boulon a permis de constater que ce dernier avait été fabriqué à partir d'acier de grade AISI 1035 (tableau 1). La composition chimique du boulon ne présente aucune anomalie.

| Éléments | Boulon brisé (%) | Spécifications AISI 1035 (%) |
|-----------|------------------|------------------------------|
| Carbone | 0,34 | 0,31 - 0,38 |
| Manganèse | 0,82 | 0,60 - 0,90 |
| Silicium | 0,18 | 0,15 - 0,30 |
| Phosphore | 0,018 | 0,040 max |
| Soufre | 0,015 | 0,050 max |
| Fer | Balance | Balance |

Tableau 1. Composition chimique du boulon brisé

Projet n° 721-23-100



3.2 L'examen visuel du boulon brisé et de la manille

L'examen visuel de la manille et du boulon brisé a permis de faire cinq observations importantes, soit :

1. La soudure joignant le boulon à la manille n'apparaît pas déformée ou fissurée et elle est visuellement adéquate (photo 6).
2. La fissure s'est amorcée au fond du filet qui était situé directement au niveau de la surface de la cabine (réf. photos 3 et photo 7).
3. Les filets du boulon sont étirés dans un cadran et comprimés à 180° (photo 7), ce qui indique qu'il s'est brisé sous l'effet d'une force de flexion. De plus, des photos fournies par la CNESST confirment que l'abatteuse était placée en angle lorsque l'opérateur a tenté de remettre la cabine en place (réf. photos 4).
4. La surface d'arrachement final est à 180° de la zone d'amorce (photo 8), ce qui confirme l'implication d'une force de flexion.
5. Une fissure secondaire est visible en dessous de la surface de rupture, du côté tension du boulon (photos 7 et 9), mais des discontinuités ont aussi été détectées du côté compression du boulon (photos 10 et 11). Ce point sera discuté à la section 3.3.
6. Selon nos estimations, la charge aurait été appliquée avec un angle minimal de 21° (photo 12). Le boulon s'est déformé jusqu'à 21° avant de rompre, mais il est fort possible que l'angle fût plus grand.

Projet n° 721-23-100

Quebec Metallurgy Center
CMQ
Centre de métallurgie du Québec

7.

Photo 6. La soudure joignant le boulon à la manille n'est pas déformée ni fissurée

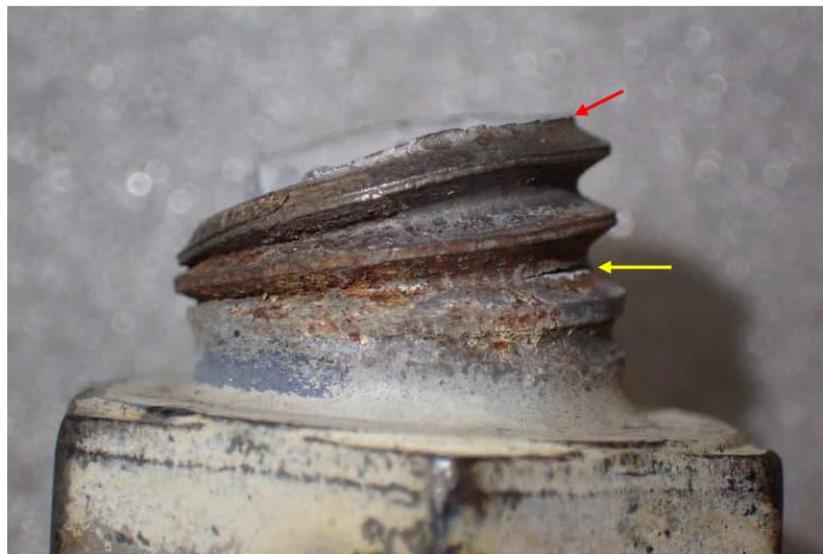


Photo 7. Section du boulon soudé à la manille

*La fissure s'est amorcée au fond du filet qui était situé au niveau de la cabine (flèche rouge)
Une fissure secondaire a été détectée dans un filet sous la surface de rupture (flèche jaune)
Les filets sont étirés dans un cadran et comprimés dans l'autre, indiquant un effet de flexion*

Projet n° 721-23-100

Quebec Metallurgy Center
CMQ
Centre de métallurgie du Québec



Photo 8. Surface de rupture du boulon
La zone d'arrachement final du boulon (cercle jaune) est à 180° de la zone d'amorce

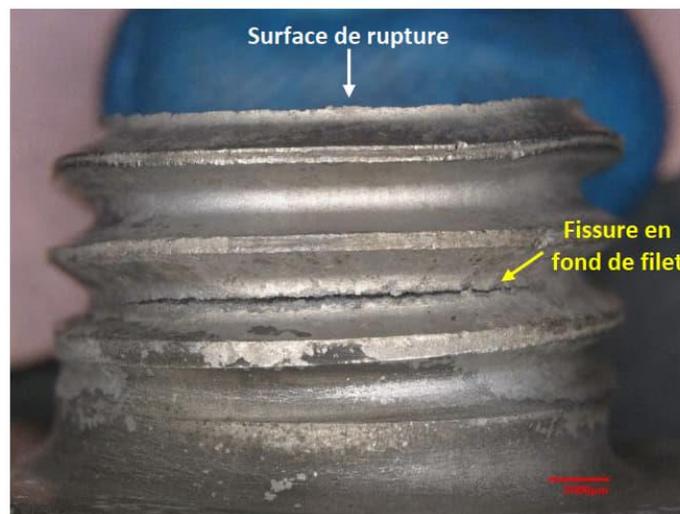
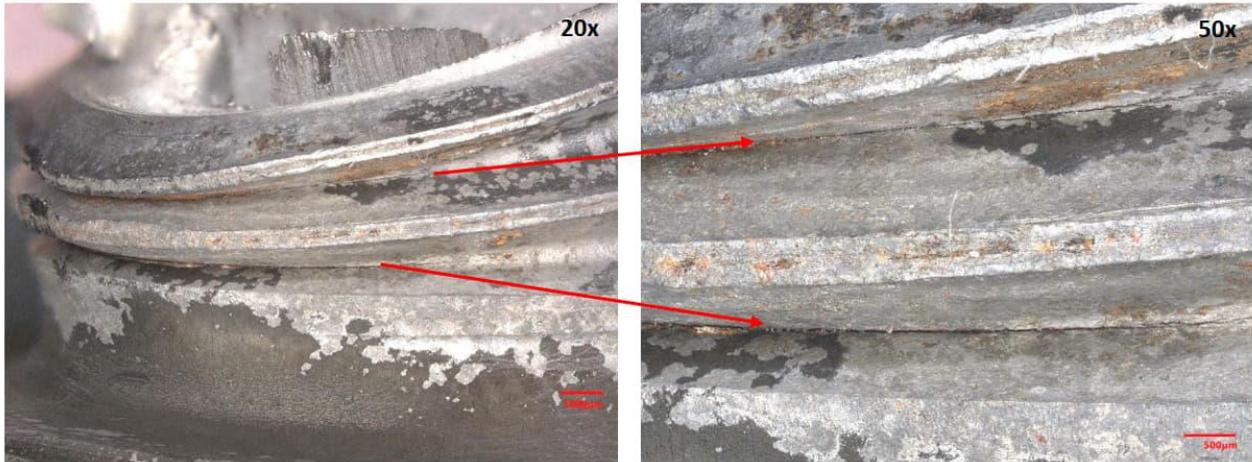


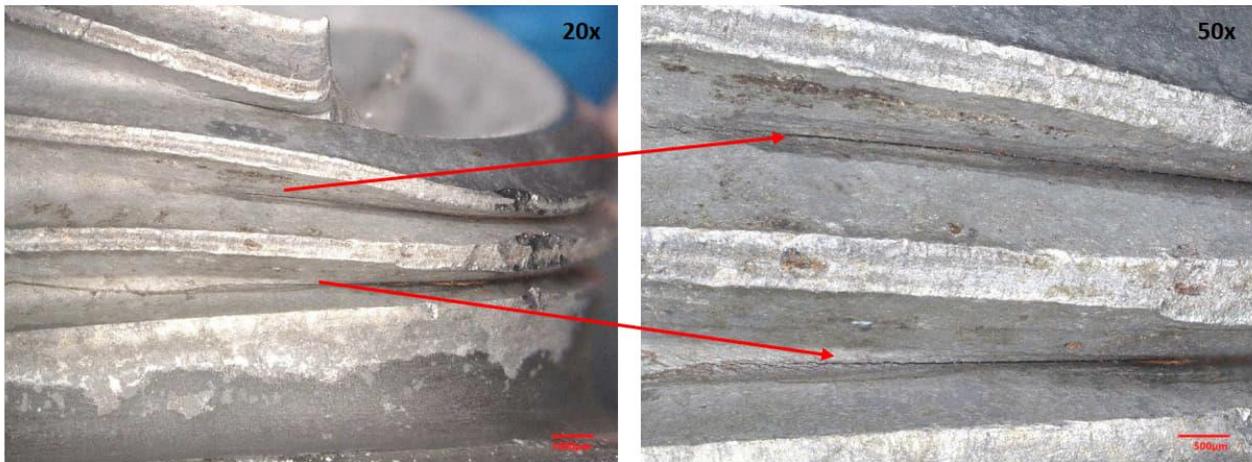
Photo 9. Section soudée à la manille – Côté en tension
Une fissure secondaire est visible dans un filet en dessous dans la surface de rupture

Projet n° 721-23-100

Quebec Metallurgy Center
CMQ
Centre de métallurgie du Québec



*Photos 10. Côté en compression droite du boulon
Discontinuités détectées dans les filets sous la surface de rupture, du côté compression du boulon*



*Photos 11. Côté en compression gauche du boulon
Discontinuités détectées dans les filets sous la surface de rupture, du côté compression du boulon*

Projet n° 721-23-100

Quebec Metallurgy Center
CMQ
Centre de métallurgie du Québec

*Photo 12. Angle de 21° mesuré sur le boulon brisé
Ceci correspond donc à l'angle minimal d'application de la charge*

3.3 L'examen métallographique du boulon

La section filetée du boulon ainsi que le morceau soudé à la manille furent coupés longitudinalement dans le but de pouvoir examiner la microstructure et les fonds de filet (photos 13 et 14).



Photos 13. Coupe et enrobage dans l'époxy de la section filetée du boulon pour les essais subséquents

Projet n° 721-23-100

Quebec Metallurgy Center
CMQ
Centre de métallurgie du Québec

Photos 14. Coupes et enrobage dans l'époxy de la section soudée du boulon pour les essais subséquents

Par la suite, les examens métallographiques ont permis de faire quatre observations importantes, soit :

1. Des discontinuités ont été détectées sur certaines têtes de filet (photo 15), mais ceci est sans conséquence puisque ces zones travaillent en compression, ce qui signifie que tout défaut se ferme en service.
2. Aucune discontinuité n'a été détectée en fond de filet de la section fileté du boulon (réf. photos 13 et photo 16).
3. Des discontinuités furent trouvées dans les deux filets en compression sous la surface de rupture (réf. photos 10, 11). À cause de (1) multiples embranchements (photos 17 et 18) et (2) leur présence dans seulement deux filets et non dans tous les filets, nous pouvons affirmer que ce sont des défauts d'aciérie formée pendant la solidification de l'acier, et donc existait depuis la mise en service du boulon.
4. Le boulon présente une microstructure saine et uniforme de martensite revenue (photo 19).

Projet n° 721-23-100

Quebec Metallurgy Center
CMQ
Centre de métallurgie du Québec

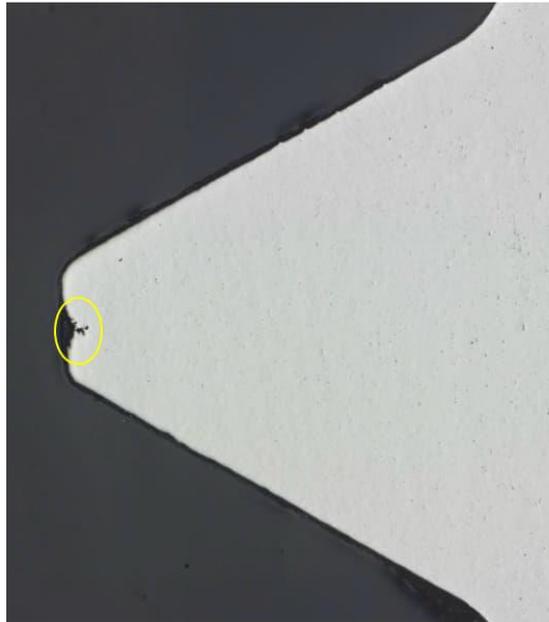


Photo 15. Section fileté du boulon
Des discontinuités (cercle jaune) ont été détectées sur la tête des filets - 100x

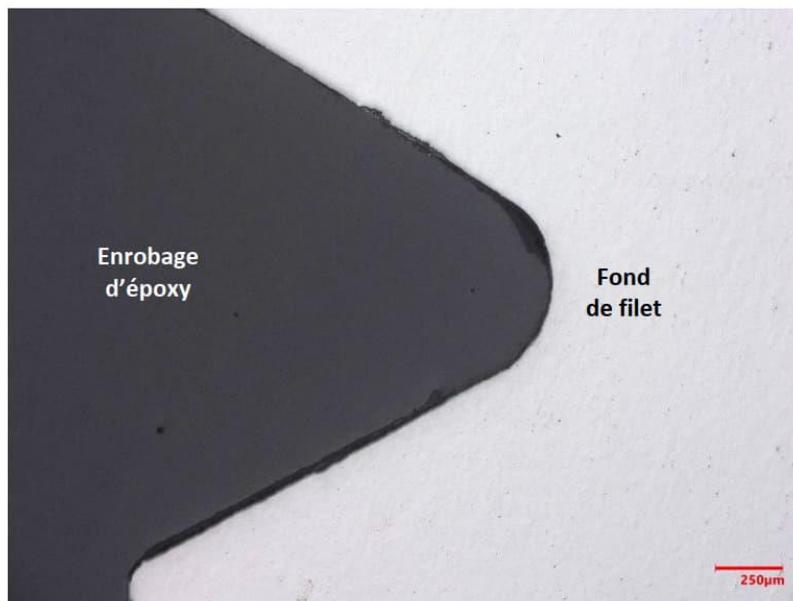
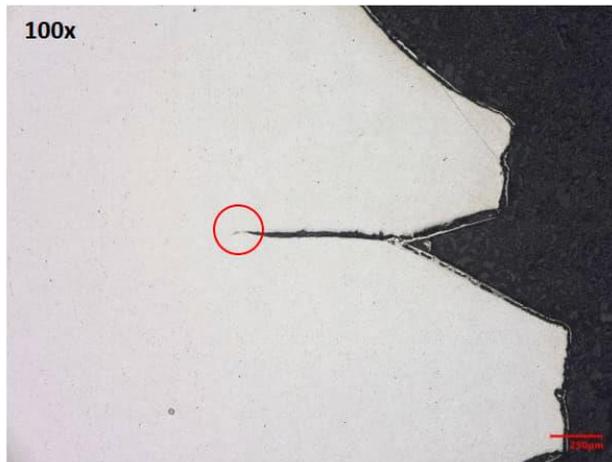


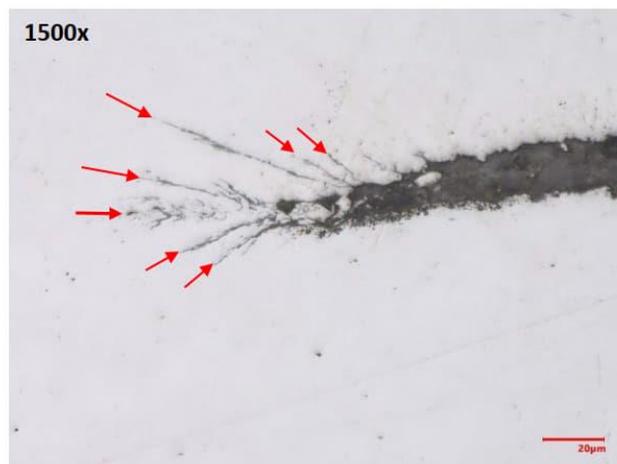
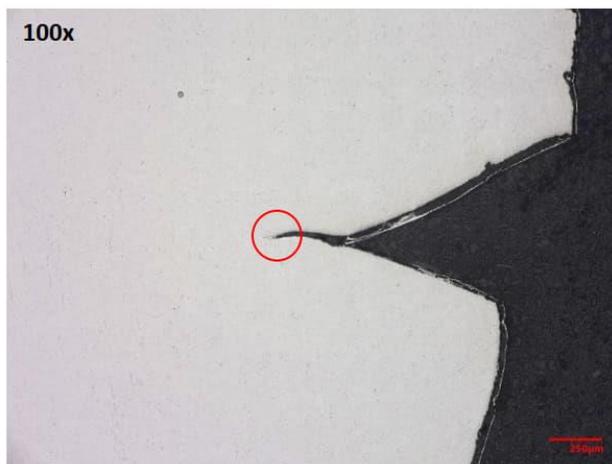
Photo 16. Section fileté du boulon
Aucune discontinuité n'a été détectée en fond de filet - 100x

Projet n° 721-23-100

Quebec Metallurgy Center
CMQ
Centre de métallurgie du Québec



Photos 17. Fissure dans le 1er filet sous la surface de rupture, du côté en compression de la section soudée
L'extrémité de la fissure (cercle rouge) présente des embranchements multiples (flèches rouges)
qui peuvent se former que pendant la solidification de l'acier



Photos 18. Fissure dans le 2me filet sous la surface de rupture, du côté en compression de la section soudée
L'extrémité de la fissure (cercle rouge) présente des embranchements multiples (flèches rouges)
qui peuvent se former que pendant la solidification de l'acier

Projet n° 721-23-100

Quebec Metallurgy Center
CMQ
Centre de métallurgie du Québec

*Photo 19. Cœur de la section fileté du boulon
Microstructure de martensite revenue saine et uniforme
Nital 2% - 1000x*

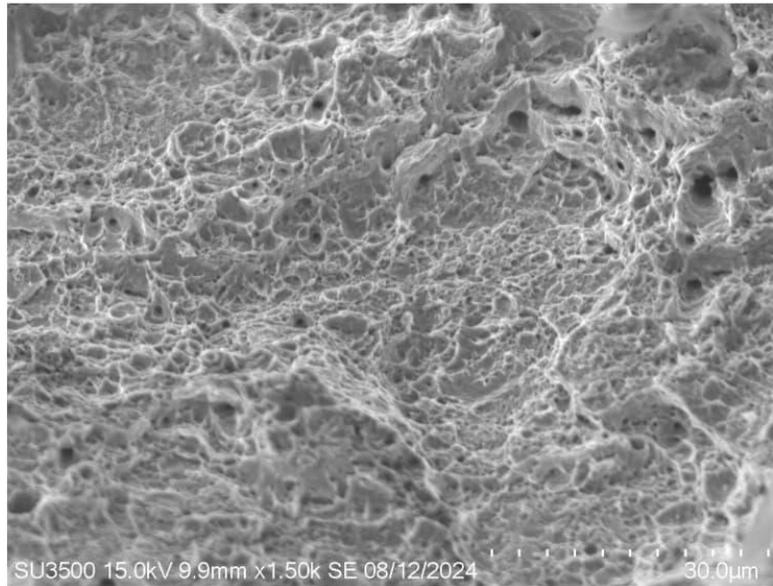
3.4 L'examen de la surface de rupture au microscope

L'examen au microscope électronique à balayage (MEB) de la surface de rupture du boulon a permis de faire deux observations, soit :

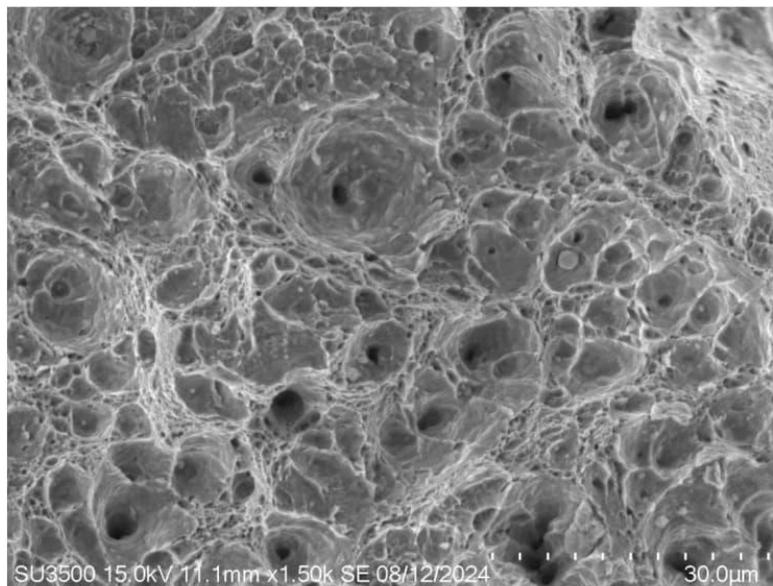
- La surface de rupture du boulon est recouverte de cupules de ductilité, autant du côté en tension du boulon que du côté en compression (photos 20 et 21), ce qui prouve que le boulon s'est brisé à la suite d'un déchirement lent de l'acier.
- La zone d'arrachement final (réf. photo 8) présente un profil de rupture transgranulaire (photo 22), ce qui caractérise un bris soudain. Il est normal que cette zone se brise rapidement, car toute la charge est appliquée sur la toute petite section qui reste, raison pour laquelle la contrainte ressentie est extrêmement élevée et que la fissure se propage très rapidement.

Projet n° 721-23-100

Quebec Metallurgy Center
CMQ
Centre de métallurgie du Québec

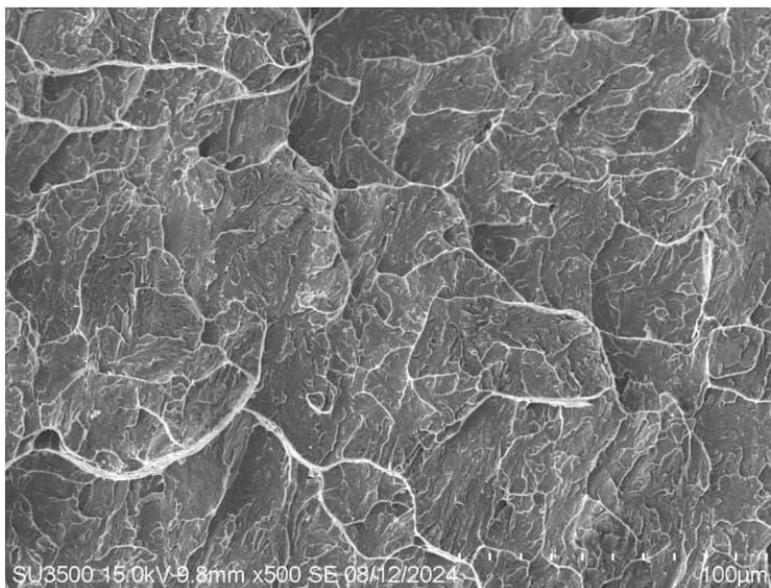


*Photo 20. Zone d'amorce du côté tension – cupules créées par un déchirement lent de l'acier
MEB – 1500x*



*Photo 21. Zone de compression - cupules créées par un déchirement lent de l'acier
MEB – 1500x*

Projet n° 721-23-100

Quebec Metallurgy Center
CMQ
Centre de métallurgie du Québec

*Photo 22. Zone d'arrachement final – profil transgranulaire créé par une propagation rapide
MEB – 500x*

3.5 Les essais de dureté

Des essais de microdureté Vickers furent effectués à plusieurs endroits sur la section filetée (réf. photos 13) du boulon et les résultats ont donné une dureté très stable de 37,4 HRC (tableau 2).

Puisqu'un des points de notre mandat était de vérifier si la soudure pouvait avoir affecté la résistance du boulon, des essais de microdureté Vickers ont été pris sur la tête et à cœur sur le morceau ayant été soudé à la manille (réf. photos 14).

La tête du boulon présentait une dureté moyenne de 31,6 HRC, ce qui signifie que la chaleur de la soudure a réduit la dureté de l'acier à cet endroit. Cependant, les duretés prises à mi-chemin entre la tête et la surface de rupture ont donné une dureté moyenne de 37,5 HRC, ce qui indique que la zone affectée par la soudure se limite à la tête du boulon et que la zone de rupture n'a pas été affectée. Autrement dit, la soudure n'a pas contribué au bris du boulon.

Projet n° 721-23-100



| Section fileté (HRC) | Morceau soudé Tête du boulon (HRC) | Morceau soudé Cœur du boulon (HRC) |
|-------------------------|--|--|
| 37,4 | 31,6 | 37,5 |

Tableau 2. Résultats moyens des essais de microdureté Vickers
Les valeurs en HRC ont été converties à partir des valeurs en HV obtenues pendant les essais

Bien qu'il fût impossible d'effectuer un essai de traction pour déterminer les propriétés mécaniques du boulon, ces dernières ont pu être estimées à partir de la dureté et du grade d'acier.

Pour ce faire, les graphiques des grades d'acier AISI 1030 et 1040 du livre « Modern Steels and their Properties » ont dû être utilisés (annexe A) et une interpolation (puisque le boulon est en AISI 1035) a permis de déterminer les propriétés mécaniques approximatives (tableau 3).

| Propriété mécanique | Boulon brisé |
|------------------------|--------------|
| Limite élastique | 793 MPa |
| Résistance en traction | 614 MPa |
| Allongement | 22% |

Tableau 3. Propriétés mécaniques du boulon estimées à partir de la dureté et du grade AISI 1035

Une résistance ultime de 793 MPa indique qu'il s'agirait d'un boulon de grade 8.8 selon la norme ISO 898, qui requiert une résistance en traction minimale de 830 MPa. La résistance du boulon brisé est trop loin des 420 MPa pour le considérer comme étant un grade 4.8. De plus, il n'existe pas de grades 5.8, 6.8 ou 7.8. Les grades de boulons passent directement de 4.8 à 8.8.

Projet n° 721-23-100



4 Calculs mécaniques et simulations

Une étude dimensionnelle du boulon et des mesures prises pendant l'examen métallographique (annexe B) ont permis de faire un modèle 3D du boulon. Par la suite, une charge de 1100 kg (le poids de la cabine selon l'information reçue) a été appliquée à différents angles par rapport à un axe vertical (axe du boulon) et les simulations par éléments finis ont permis de calculer la contrainte maximale ressentie selon l'angle (tableau 4 et graphique 1).

Dans le premier scénario, la longueur réelle du boulon a été considérée, c'est-à-dire que les simulations prenaient en considération que la tête du boulon n'était pas appuyée sur la cabine, créant ainsi un effet de flexion plus important. Les simulations ont permis de démontrer que :

- La contrainte maximale ressentie se situe au fond du filet se trouvant au niveau de la cabine (réf. photo 3 et photo 23), qui est le filet qui s'est déchiré.
- Si le boulon avait été chargé de manière axiale (100% en tension), la contrainte maximale ressentie aurait été de 370 MPa, ce qui signifie qu'il ne se serait pas brisé puisque sa limite élastique est de 614 MPa.
- Dès que la charge est appliquée avec un angle, l'effet de flexion engendre une contrainte très importante en fond de filet et la résistance ultime en traction est rapidement surpassée. En effet, la résistance ultime de 793 MPa du boulon est dépassée à un angle de seulement 2° (graphique 1).

Projet n° 721-23-100



Dans le deuxième scénario, les simulations ont été faites en assumant que la tête du boulon aurait été appuyée sur la cabine sans couple de serrage. Ces simulations ont démontré que :

- La contrainte maximale ressentie est encore une fois à la hauteur de la cabine, mais cette fois-ci se retrouve directement à la base de la tête du boulon (photo 24).
- L'effet de flexion engendre une rotation de la tête du boulon, mais le mouvement est limité puisqu'elle serait appuyée sur la cabine (photo 24).
- Comme pour le scénario 1, un chargement 100% axial du boulon n'aurait pas causé son bris puisque la contrainte maximale ressentie aurait été 220 MPa.
- L'effet de flexion est bien moins important dans ce scénario et un angle de chargement de seulement 24° aurait été nécessaire pour que la contrainte dépasse la résistance du boulon. Bien que nous ayons dit que l'angle minimal se situait autour de 21° (réf. photo 12), l'angle réel a fort possiblement été plus élevé, ce qui nous laisse croire que le boulon se serait quand même brisé avec sa tête appuyée sur la cabine.

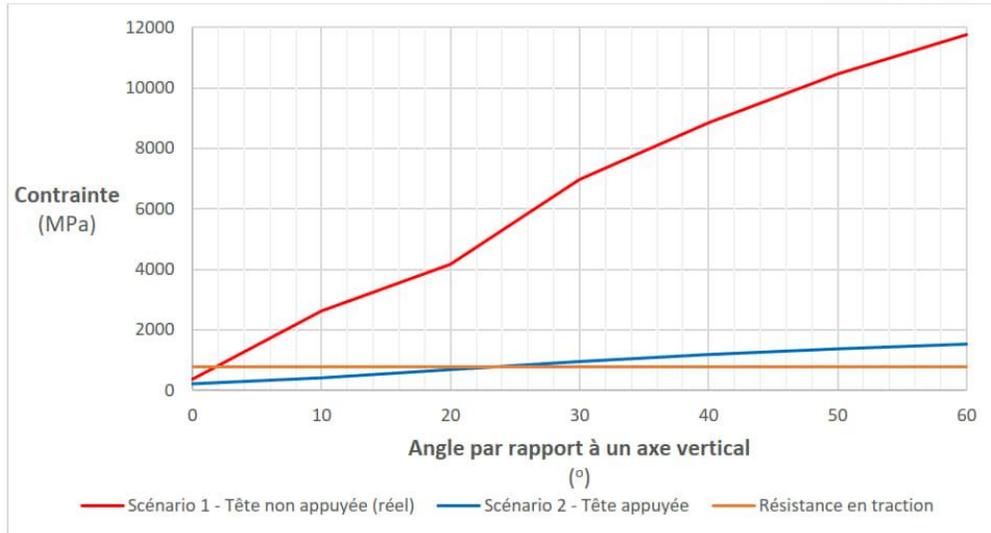
| Angle par rapport à un axe vertical (°) | Scénario 1 Tête non appuyée (MPa) | Scénario 2 Tête appuyée (MPa) | Limite élastique du boulon (MPa) | Résistance en traction du boulon (MPa) |
|---|--------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--|
| 0 | 370 | 220 | 614 | 793 |
| 10 | 2 629 | 412 | 614 | 793 |
| 20 | 4 172 | 693 | 614 | 793 |
| 30 | 6 966 | 953 | 614 | 793 |
| 40 | 8 848 | 1 183 | 614 | 793 |
| 50 | 10 460 | 1 378 | 614 | 793 |
| 60 | 11 756 | 1 531 | 614 | 793 |

*Tableau 4. Contraintes maximales ressenties selon l'angle appliqué
Les chiffres en rouge indiquent que la résistance en traction du boulon a été dépassée*

Projet n° 721-23-100

Quebec Metallurgy Center

 Centre de métallurgie du Québec



Graphique 1. Résultats des simulations par éléments finis
 Contrainte maximale ressentie selon l'angle de chargement par rapport à un axe vertical

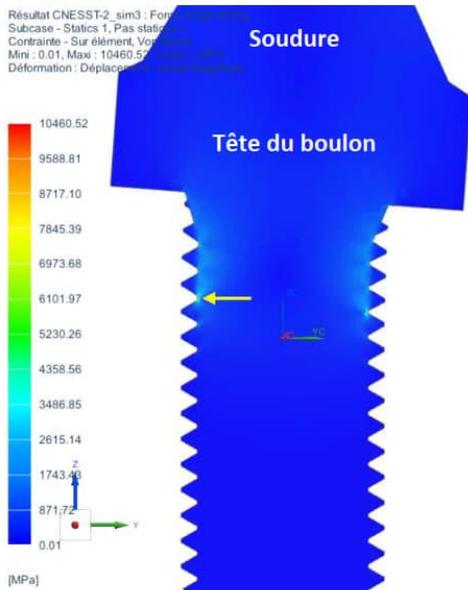


Photo 23. Scénario 1 – tête non appuyée
 La contrainte maximale est ressentie dans le filet à la hauteur de la cabine (flèche jaune)

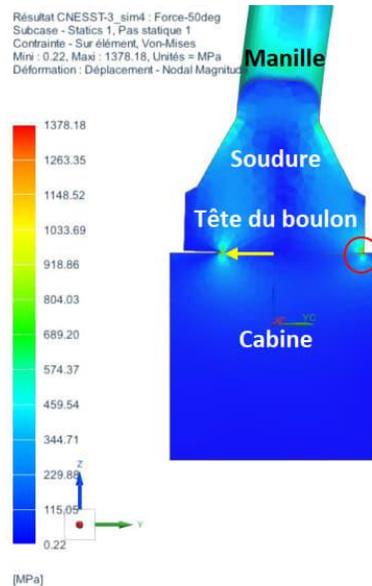


Photo 24. Scénario 2 – Tête appuyée
 La contrainte maximale est ressentie à la base de la tête (flèche jaune). La tête du boulon serait appuyée contre la cabine due à la flexion (cercle rouge)

Projet n° 721-23-100

Quebec Metallurgy Center

Centre de métallurgie du Québec

5 Discussion

À la suite de nos examens, essais et simulations, nous sommes d'avis que le bris du boulon a été causé par l'effet de flexion engendrée par l'angle créée pour déplacer la cabine. Plusieurs points corroborent cette hypothèse, soit :

- Les images fournies par la CNESST prouvant que la cabine avait été déplacée à angle par rapport à un axe vertical (réf. photos 4 et 5).
- L'aspect visuel du boulon, particulièrement les filets étirés dans un cadran et comprimés dans l'autre, confirme qu'il s'est brisé sous l'effet d'une force en flexion.
- Les simulations par éléments finis ont prouvé que le boulon ne se serait pas brisé s'il avait été chargé de manière 100% axiale.
- Bien que la longueur excessive du boulon ait grandement augmenté l'effet de flexion et la contrainte ressentie, les simulations nous laissent croire que le boulon se serait très probablement brisé même s'il avait été moins long et que sa tête avait été appuyée sur la cabine, car un angle de seulement 24° aurait été suffisant pour briser le boulon dans ce scénario, alors que l'angle *minimal* de chargement était de 21°. Il est important de noter que les simulations prenaient en compte qu'aucun couple de serrage n'était appliqué au boulon.

Bien que des défauts d'aciérie ont été détectés dans le fond des discontinuités des filets en compression (réf. photos 10, 11, 17 et 18), nous sommes d'avis qu'ils sont d'importance secondaire, parce que :

- Il n'y a aucun moyen de savoir s'il y en avait dans le filet qui s'est complètement déchiré parce que les filets subséquents n'en présentaient pas (réf. photos 13 et 16)
- Nous estimons que le boulon avait été chargé avec un angle minimal de 21° par rapport à un axe vertical (réf. photo 12), ce qui aurait engendré une contrainte égale ou supérieure à 4 170 MPa. Ceci signifie que le boulon se serait brisé, qu'il y ait eu des défauts d'aciérie ou non.

Projet n° 721-23-100



Finalement, les essais de microdureté Vickers ont permis de prouver que la soudure du boulon n'avait pas contribué au bris parce que la zone affectée par la chaleur de la soudure se limitait à la tête du boulon.

Pour résumer, le mandat de notre expertise consistait à :

1. Déterminer le grade du boulon et le type d'acier utilisé : le boulon se rapprochait d'un boulon de grade 8.8 selon la norme ISO 898 et était constitué d'acier AISI 1035.
2. Déterminer la capacité du boulon en tenant compte de l'angle de rupture en cisaillement¹ : les simulations par éléments finis ont permis de calculer la contrainte ressentie selon plusieurs angles et ont permis de démontrer que la résistance du boulon était largement dépassée pour l'angle de chargement estimé.
3. Déterminer si la soudure de l'anneau peut avoir eu une incidence sur la résistance du boulon : bien que la chaleur de la soudure ait réduit la dureté localement sur la tête du boulon, la zone du bris n'a pas été affectée. La soudure n'a donc pas eu d'incidence sur le bris du boulon.
4. Déterminer l'impact potentiel de l'espacement créé par la longueur excessive du boulon : l'effet de flexion engendré par le bras de levier était énorme et a grandement facilité le bris du boulon, mais les simulations ont démontré que le boulon se serait très vraisemblablement brisé même si la longueur avait été respectée et que sa tête avait été appuyée sur la cabine.

¹ À noter qu'ici, le terme cisaillement n'est pas exact. Le boulon s'est plutôt brisé sous l'effet d'une force en flexion.

Projet n° 721-23-100



6 Conclusion

En nous basant sur nos observations, examens et simulations, nous sommes d'avis que le boulon s'est brisé à cause de l'effet de flexion engendrée par l'angle entre le chargement de la cabine et l'axe vertical (axe du boulon). Bien que la longueur excessive du boulon ait grandement facilité le bris, les simulations ont permis de démontrer qu'il se serait vraisemblablement brisé même si la tête du boulon avait été appuyée sur la surface de la cabine.

Considérant la surcharge appliquée sur boulon, la soudure et les défauts d'aciérie en fond de filets ne sont pas des facteurs à considérer dans le bris du boulon. Finalement, un pont roulant n'est pas conçu pour tirer en angle, mais plutôt pour soulever verticalement et déplacer une charge.

Pierrick Cyrenne, CPI

Signature numérique de
Philippe Vachon-
Joannette
Date : 2024.09.04
10:08:22 -04'00'

Philippe Vachon-Joannette, CPI

Luc Lafrenière, ing.

Processus d'amélioration continue

Nous souhaitons ardemment avoir répondu à l'ensemble de vos besoins. Ainsi, dans le cadre de nos processus d'amélioration continue ISO 9001:2015 et ISO 17025:2017, nous sommes disposés à recevoir vos commentaires de manière à améliorer nos prochaines interventions.

Projet n° 721-23-100



Annexe A

Graphiques des propriétés mécaniques des aciers AISI 1030 et 1040

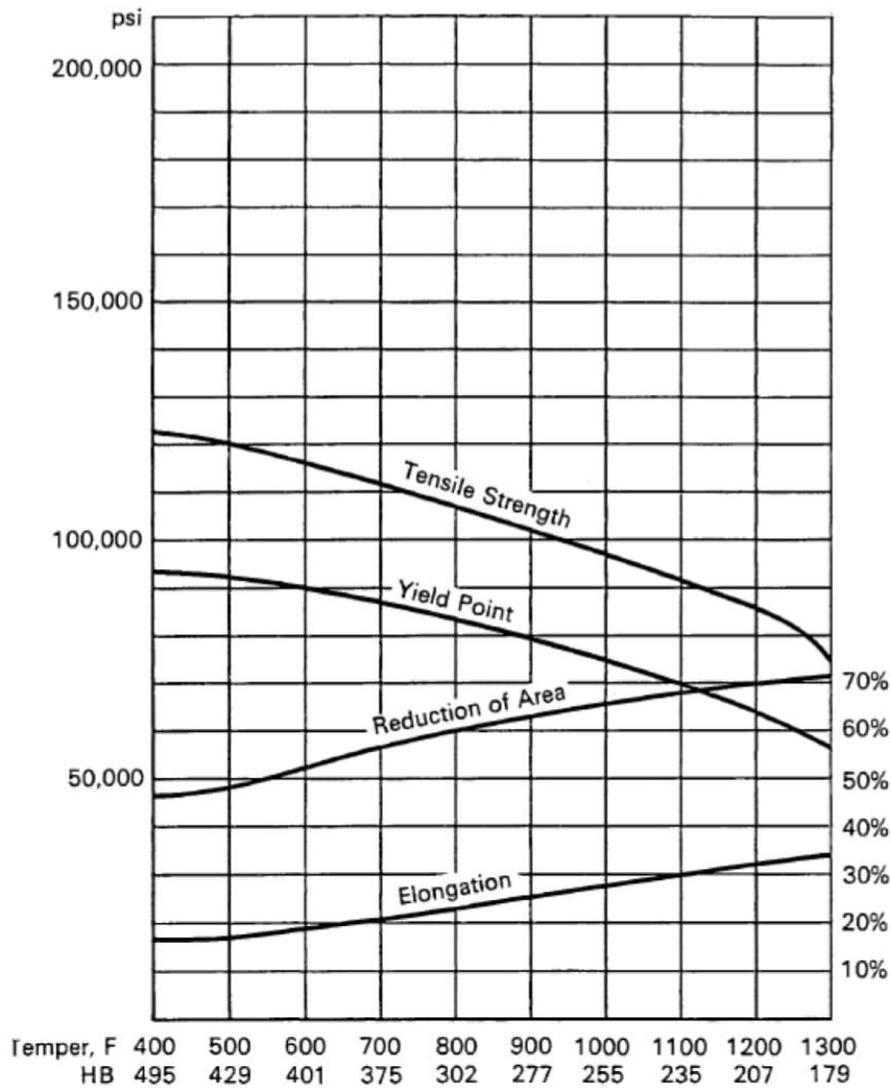
Modern Steels and their properties – Carbon and Alloy Steel Bars and Rods

Projet n° 721-23-100



Water-quenched 1030

Treatment: Normalized at 1700 F; reheated to 1600 F; quenched in water,
1-in. Round Treated; .505-in. Round Tested. As-quenched HB 514.



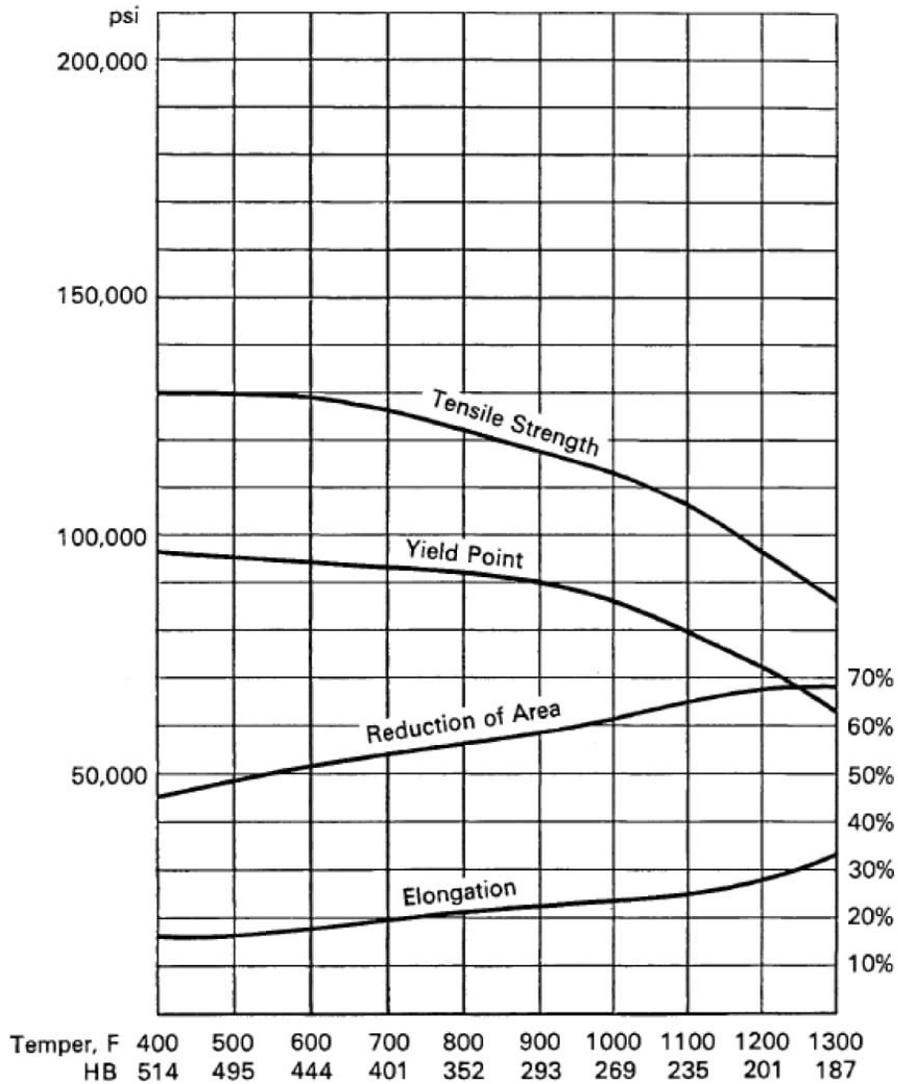
95

Projet n° 721-23-100



Water-quenched 1040

Treatment: Normalized at 1650 F; reheated to 1550 F; quenched in water.
1-in. Round Treated; .505-in. Round Tested. As-quenched HB 534.



99

Projet n° 721-23-100



Annexe B

Détails des mesures prises sur la section fileté du boulon

Projet n° 721-23-100

Quebec Metallurgy Center
 Centre de métallurgie du Québec

| Boulon entier | | | | | | |
|-------------------------|--------------|--------|--------|---------|------------|--------------|
| Emplacement des mesures | Mesures (µm) | | | Moyenne | Écart type | Répétabilité |
| Minor Diameter | 16 118 | 16 270 | 16 311 | 16 233 | 102 | 0,6% |
| Major Diameter | 19 262 | 19 305 | 19 312 | 19 293 | 27 | 0,1% |

| Filets au-dessus du boulon | | | | | | |
|----------------------------|--------------|-------|-------|---------|------------|--------------|
| Emplacement des mesures | Mesures (µm) | | | Moyenne | Écart type | Répétabilité |
| Pitch | 2 507 | 2 544 | 2 517 | 2 523 | 19 | 0,8% |
| Thread Angle (deg) | 58 | 59 | 59 | 59 | 1 | 1,0% |
| Depth | 1 538 | 1 552 | 1 549 | 1 546 | 7 | 0,5% |
| Radius | 319 | 320 | 323 | 321 | 2 | 0,6% |
| Crest | 430 | 418 | 381 | 410 | 26 | 6,2% |

| Filets en dessous du boulon | | | | | | |
|-----------------------------|--------------|------|------|---------|------------|--------------|
| Emplacement des mesures | Mesures (µm) | | | Moyenne | Écart type | Répétabilité |
| Pitch | 2544 | 2475 | 2482 | 2 500 | 38 | 1,5% |
| Thread Angle (Deg) | 59 | 59 | 59 | 59 | 0 | 0,0% |
| Depth | 1550 | 1553 | 1473 | 1 525 | 45 | 3,0% |
| Radius | 308 | 320 | 323 | 317 | 8 | 2,5% |
| Crest | 426 | 371 | 382 | 393 | 29 | 7,4% |

