

RAPPORT D'ENQUÊTE**EN004431**

**Accident ayant causé des blessures à cinq travailleurs
de l'entreprise Maçonnerie Gervais et Associés inc.,
survenu le 28 février 2024 à Trois-Rivières**

Version dépersonnalisée

Service de la prévention-inspection – Mauricie et Centre-du-Québec

Inspecteur

Steve Laperle

Inspectrice :

Julie Lavoie

Date du rapport : 16 janvier 2025

Rapport distribué à :

- Monsieur Keven Dallaire, président, Maçonnerie Gervais et Associés inc.
 - Directeur de la santé publique et de la responsabilité populationnelle, Centre intégré universitaire de santé et de services sociaux de la Mauricie-et-du-Centre-du-Québec
 - Madame Marie-Claude Houle, présidente, EBC inc.
 - Monsieur Éric Boisjoly, directeur général, Fédération des travailleurs et travailleuses du Québec (FTQ-Construction)
 - Monsieur Carl Dufour, président, Confédération des syndicats démocratiques (CSD Construction)
 - Monsieur Pierre Brassard, président, Confédération des syndicats nationaux (CSN-Construction)
 - Monsieur Sylvain Gendron, président, Syndicat québécois de la Construction (SQC)
 - Monsieur Michel Trépanier, président, Conseil provincial du Québec des métiers de la construction (International)
-

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 DU CHANTIER	3
2.2	ORGANISATION DE LA SANTÉ ET DE LA SÉCURITÉ DU TRAVAIL	4
2.2.1	EBC INC. (MAÎTRE D'ŒUVRE)	4
2.2.1.1	Mécanismes de participation	4
2.2.1.2	Gestion de la santé et de la sécurité	4
2.2.2	MAÇONNERIE GERVAIS ET ASSOCIÉS INC. (SOUS-TRAITANT)	5
2.2.2.1	Mécanismes de participation	5
2.2.2.2	Gestion de la santé et de la sécurité	6
<u>3</u>	<u>DESCRIPTION DU TRAVAIL</u>	<u>7</u>
3.1	DESCRIPTION DU LIEU DE TRAVAIL	7
3.2	DESCRIPTION DU TRAVAIL À EFFECTUER	8
<u>4</u>	<u>ACCIDENT : FAITS ET ANALYSE</u>	<u>11</u>
4.1	CHRONOLOGIE DE L'ACCIDENT	11
4.2	CONSTATATIONS ET INFORMATIONS RECUEILLIES	12
4.2.1	UNITÉS MOTORISÉES UTILISÉES LORS DE L'ACCIDENT	12
4.2.2	PONTS MODULAIRES POSITIONNÉS EN APPUI	15
4.2.2.1	Installation d'un pont positionné en appui	17
4.2.2.2	Rupture des membrures du pont	19
4.2.2.3	Charge présente sur le pont au moment de son effondrement	22
4.2.2.4	Rapport sur les facteurs possibles de l'effondrement d'un pont d'échafaudage	23
4.2.3	MANUEL D'INSTRUCTIONS DU FABRICANT	24
4.2.3.1	Version du manuel du fabricant	24
4.2.3.2	Exigences du fabricant quant à l'utilisation d'un pont positionné en appui	24
4.2.3.3	Exigences du fabricant quant à l'amarrage	25
4.2.3.4	Capacité du pont en appui	26
4.2.3.5	Exigences quant à l'inspection des unités motorisées	27
4.2.3.6	Exigences quant à l'inspection et la réparation des ponts modulaires	27
4.2.3.7	Exigences quant à la formation	29
4.2.4	LOI, RÉGLEMENTATION ET RÈGLES DE L'ART	29
4.2.4.1	Loi sur la santé et la sécurité du travail (LSST)	29

4.2.4.2	Code de sécurité pour les travaux de construction (CSTC)	29
4.2.4.3	Norme CSA B354.9 : 17 – Conception, calculs, exigences relatives à la sécurité et méthodes d'essai pour des plates-formes de travail se déplaçant le long de mâts (MCWP)	32
4.3	ÉNONCÉS ET ANALYSE DES CAUSES	33
4.3.1	LA RUPTURE DES MEMBRURES INFÉRIEURES DU PONT MODULAIRE P-1 ENTRAÎNE L'EFFONDREMENT DU PONT EN APPUI ET LA CHUTE DES MAÇONS.	33
4.3.2	LA FORCE DE TRACTION EXERCÉE SUR LES MEMBRURES INFÉRIEURES DU PONT MODULAIRE P-1 EXCÈDE LEUR RÉSISTANCE QUI EST CONSIDÉRABLEMENT RÉDUITE SOUS L'EFFET DE LA CORROSION AVANCÉE DES PROFILÉS D'ACIER.	33
4.3.3	LA GESTION DÉFICIENTE DE L'INSPECTION ET DE L'ENTRETIEN DES PONTS MODULAIRES COMPROMET LA SÉCURITÉ DES MAÇONS.	34
5	CONCLUSION	36
5.1	CAUSES DE L'ACCIDENT	36
5.2	SUIVIS DE L'ENQUÊTE	36
6	ANNEXE	37
	ANNEXE A-ACCIDENTÉS	37
	ANNEXE B-SOMMAIRE D'INVESTIGATION LIÉE À LA MÉTALLURGIE	40
	ANNEXE C-RAPPORT D'EXPERTISE	63
	ANNEXE D-RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	94

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

Le 28 février 2024, vers 8 h, cinq maçons exécutent des travaux sur un mur extérieur de la maison des aînés en construction située à Trois-Rivières. Ils se trouvent sur un pont de 16,2 m de longueur qui est en appui sur deux échafaudages à tour et à plateforme motorisés. Alors que le pont se trouve à une hauteur d'environ 7,6 m, les membrures inférieures du pont modulaire P-1 cèdent, entraînant l'effondrement du pont en appui et la chute des travailleurs.

Conséquence

Des travailleurs subissent des blessures.



Figure 1 - *Effondrement de l'échafaudage*
Source : CNESST

Abrégé des causes

- La rupture des membrures inférieures du pont modulaire P-1 entraîne l'effondrement du pont en appui et la chute des maçons.

- La force de traction exercée sur les membrures inférieures du pont modulaire P-1 excède leur résistance qui est considérablement réduite sous l'effet de la corrosion avancée des profilés d'acier.
- La gestion déficiente de l'inspection et de l'entretien des ponts modulaires compromet la sécurité des maçons.

Mesures correctives

Dans le rapport d'intervention RAP1458552, produit le 28 février 2024, la CNESST interdit tout travail et l'accès au bâtiment situé au 6, rue Fusey à Trois-Rivières. Le maître d'œuvre et l'employeur doivent fournir à la CNESST une procédure de travail sécuritaire pour déplacer les bouteilles de gaz comprimés qui sont à proximité de la zone à risque d'effondrement.

Dans le rapport d'intervention RAP1458888, produit le 1er mars 2024, la CNESST autorise l'accès temporaire à la zone délimitée à proximité de l'échafaudage à tour et à plateforme pour le déplacement des bouteilles de gaz comprimés. Une fois les bouteilles de gaz déplacées, l'accès au bâtiment est autorisé.

Dans le rapport d'intervention RAP1460156, produit le 13 mars 2024, la CNESST autorise le démantèlement de l'échafaudage à tour et à plateforme situé au 6, rue Fusey à Trois-Rivières, à la suite de la réception d'une procédure de démantèlement signée et scellée par un ingénieur.

Dans le rapport d'intervention RAP1460436, produit le 20 mars 2024, la CNESST autorise l'accès à la zone de travail délimitée à la suite du démantèlement de l'échafaudage à tour et à plateforme impliqué dans l'accident.

Dans le rapport d'intervention RAP1461055, produit le 20 mars 2024, la CNESST interdit l'utilisation des unités motorisées de marque Hydro Mobile et les cinq ponts modulaires impliqués dans l'accident.

Dans le rapport d'intervention RAP1469383, produit le 6 juin 2024, la CNESST autorise l'utilisation des unités motorisées de marque Hydro Mobile impliquées dans l'accident à la suite de la réception des rapports d'inspection visuelle et structurale.

Dans le rapport d'intervention RAP1481069, produit le 13 septembre 2024, la CNESST autorise l'utilisation du pont intégré à usages multiples (EXT02-096) et du pont modulaire de 1,5 m (5BM2-175), mais rend permanentes les décisions émises relatives aux ponts modulaires de 5,5 m et de 3 m.

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 du chantier**

Il s'agit d'un chantier où s'effectue la construction de la maison des aînés située au 6, rue Fusey à Trois-Rivières. Les travaux ont débuté vers le 13 juin 2022. Le nombre maximal de travailleurs prévu, à un moment donné des travaux, est de 135.

Avant le début des travaux sur un chantier de construction, le maître d'œuvre doit transmettre à la CNESST un avis d'ouverture de chantier. Celui-ci a été transmis le 24 mai 2022. Considérant la date de transmission de l'avis d'ouverture de chantier, les nouvelles dispositions modifiant les obligations en lien avec les mécanismes de prévention et de participation sur les chantiers de construction ne sont pas en vigueur.

EBC inc. est le maître d'œuvre du chantier de construction puisqu'il a la responsabilité de l'exécution de l'ensemble des travaux de construction et qu'il octroie les contrats aux employeurs sous-traitants.

EBC inc. a recours aux services de l'entreprise Maçonnerie Gervais et Associés inc. pour les travaux de maçonnerie des divisions intérieures en blocs de béton et du parement extérieur en brique.

L'entreprise Maçonnerie Gervais et Associés inc. se spécialise dans les travaux de maçonnerie. Elle embauche environ 30 travailleurs de la construction, soit des maçons et des manœuvres. Sur ce chantier, l'entreprise effectue les travaux mentionnés ci-haut avec l'aide d'environ 8 à 12 travailleurs, selon les besoins.

Pour EBC inc., la structure organisationnelle du chantier comprend, entre autres, un directeur de projet, une chargée de projet, un surintendant, un agent de sécurité et un contremaître.

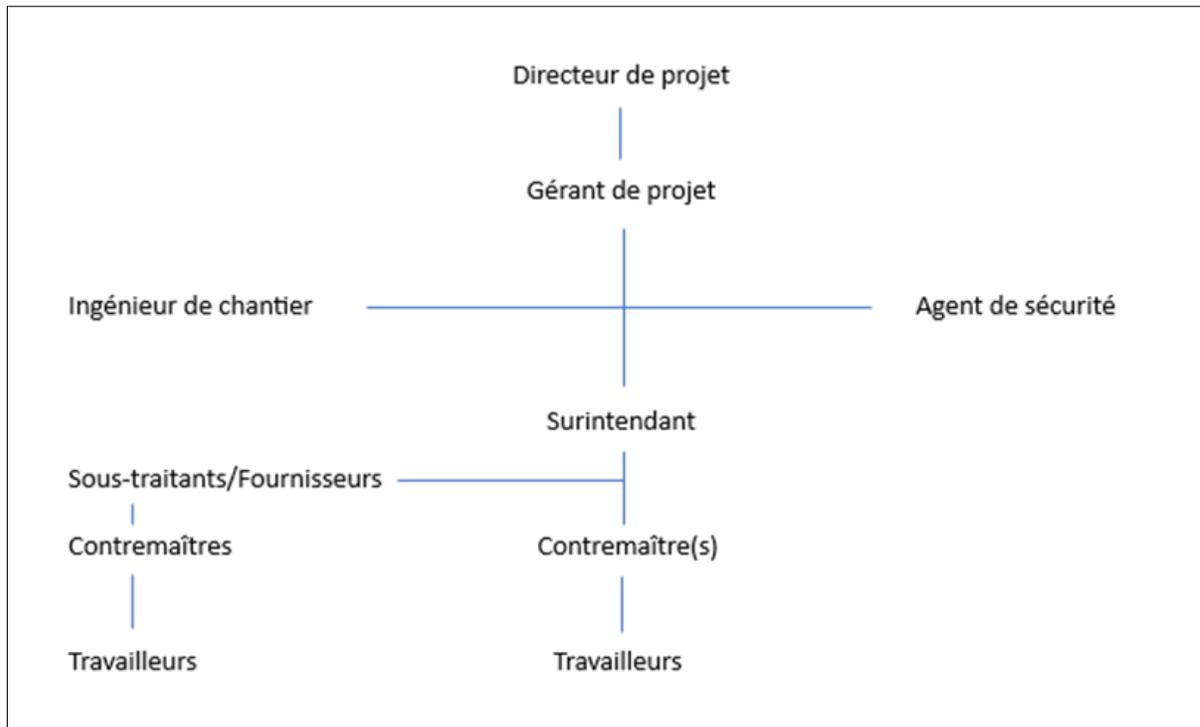


Fig. 2 - Organigramme du chantier
Source : CNESST

2.2 Organisation de la santé et de la sécurité du travail

2.2.1 EBC inc. (maître d'œuvre)

2.2.1.1 Mécanismes de participation

Pour un chantier de cette envergure, le *Code de sécurité pour les travaux de construction* (CSTC) exige la présence d'un agent de sécurité et la formation d'un comité de chantier. Un agent de sécurité est présent au chantier. Il est responsable de l'organisation ainsi que de l'animation du comité de chantier en collaboration avec le surintendant et le contremaître. Les rencontres du comité de chantier ont lieu toutes les deux semaines. Les représentants des employeurs sous-traitants participent à ces comités. À la suite de la rencontre du comité de chantier, chaque sous-traitant doit tenir une pause-sécurité afin d'informer leurs travailleurs des sujets et des notions convenus.

2.2.1.2 Gestion de la santé et de la sécurité

Le maître d'œuvre se spécialise dans des projets de grande envergure et fait partie du secteur d'activité économique *Bâtiment et travaux publics*. Conformément à l'article 58 de la *Loi sur la santé et la sécurité du travail* (LSST), l'appartenance à ce groupe oblige les entreprises à mettre en application un programme de prévention.

Le maître d'œuvre met en application un programme de prévention au chantier. Celui-ci comprend, entre autres, une politique pour les travaux en hauteur qui identifie les risques de

chute de personnes, d'objets ou de matériaux. La politique exige que l'employeur planifie, élabore et communique une méthode de travail à ses travailleurs avant d'entreprendre des travaux en hauteur.

Le surintendant, l'agent de sécurité et le contremaître sont présents à plein temps sur le chantier comme représentants du maître d'œuvre.

Le surintendant est responsable de coordonner l'exécution des travaux et la mise en place des mécanismes de gestion de la santé et de la sécurité du travail. Il effectue régulièrement des tournées du chantier afin de valider la mise en place des mécanismes. Le contremaître l'assiste dans la coordination de ses tâches.

Tout travailleur qui arrive au chantier, pour la première fois, reçoit un accueil santé et sécurité du travail (SST) présenté par l'agent de sécurité. Celui-ci anime les comités de chantier auxquels participent les employeurs présents. Les notions de santé et de sécurité sont également intégrées à la rencontre de coordination hebdomadaire des travaux.

Une fois par semaine, chaque sous-traitant doit effectuer une pause-sécurité avec tous ses travailleurs au chantier et le compte-rendu doit être remis à l'agent de sécurité.

Chaque semaine, les sous-traitants complètent une analyse sécuritaire et environnementale des tâches (ASET) pour les différentes tâches exécutées au chantier.

Le maître d'œuvre exige également aux travailleurs de tous ses sous-traitants de tenir un calepin de temps d'arrêt, appelé A3, afin d'évaluer leurs tâches et leurs méthodes de travail en cours d'exécution.

De plus, au moins une fois par semaine, le surintendant et/ou le contremaître effectuent une intervention avec un employeur au cours de laquelle ils répondent à un questionnaire de conformité en matière de santé et de sécurité du travail.

Enfin, une fois par mois, le maître d'œuvre sélectionne un entrepreneur présent au chantier afin de réviser le tableau d'analyse de risques incluant une tournée de chantier et la vérification de son cartable (fiches de données de sécurité, ASET, etc.).

2.2.2 Maçonnerie Gervais et Associés inc. (sous-traitant)

2.2.2.1 Mécanismes de participation

L'entreprise se spécialise dans les travaux de maçonnerie réalisés sur les chantiers de construction, principalement dans les secteurs commerciaux et résidentiels. Elle fait partie du secteur d'activité économique *Bâtiment et travaux publics* et [REDACTED]. Conformément à l'article 58 de la LSST, l'appartenance à ce groupe oblige l'entreprise à mettre en application un programme de prévention.

2.2.2.2 Gestion de la santé et de la sécurité

L'entreprise possède un programme de prévention général pour les chantiers de construction. Ce programme comprend, entre autres, les mesures préventives à appliquer relativement aux risques de chute de hauteur et les différents dispositifs de protection collective ou individuelle. On y retrouve également les mesures préventives pour l'utilisation des échafaudages sur cadres métalliques, mais il ne comprend pas, malgré une utilisation régulière, les mesures applicables aux échafaudages à tour et à plateforme motorisés. Différentes politiques sont élaborées sur la planification sécuritaire générale, sur la santé et la sécurité ainsi que sur l'identification et le contrôle des risques.

La politique de l'entreprise en matière de santé et de sécurité du travail indique que le contremaître sur le chantier surveille la mise en application du programme de prévention et exige les correctifs nécessaires. Le contremaître est la personne-ressource quant à la santé et la sécurité sur le chantier tandis que le surintendant effectue des visites sur les chantiers qui sont sous sa responsabilité.

Le contremaître assure la gestion et la coordination des travaux de maçonnerie sur le chantier et communique, au besoin, avec son employeur et son surintendant. Il collabore avec le surintendant, le contremaître et l'agent de sécurité du maître d'œuvre en matière de santé et de sécurité du travail.

Le contremaître et les travailleurs participent aux principaux mécanismes de participation et de gestion de la santé et de la sécurité mis en place par le maître d'œuvre.

Il est à noter que les mécanismes de participation et de gestion de la santé et de la sécurité du travail, mis en place au chantier, n'ont pas permis d'identifier, de contrôler et d'éliminer les risques liés aux travaux en hauteur accomplis à l'aide d'un échafaudage à tour et à plateforme motorisé muni d'un pont en appui.

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

Le chantier consiste à construire une maison des aînés de trois étages, d'une superficie d'environ 12 000 m², à Trois-Rivières. La construction d'un tel bâtiment exige la présence sur le chantier d'entrepreneurs spécialisés dans des domaines variés. Au moment de l'accident, plusieurs travaux sont en cours dont les travaux de maçonnerie.

Le jour de l'accident, les maçons s'affairent à la pose du parement de brique sur le mur extérieur sud-est. Ce dernier est situé du côté de la rue Perreault. Les dimensions du mur sont d'environ 20 m de largeur par 10 m de hauteur. À cet endroit, une marquise en acier d'environ 16 m de longueur par 3 m de hauteur est fixée au mur extérieur.



Fig. 3 - État des lieux à la suite de l'accident

Source: CNESST



Fig. 4 - Lieu de l'accident – Travaux sur le bâtiment terminés

Source : CNESST

Selon le ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs, la température maximale enregistrée à Trois-Rivières, le 28 février 2024, varie entre 1 °C et 12,1 °C. Aucune précipitation n'est enregistrée au cours de cette journée.

3.2 Description du travail à effectuer

Le 28 février 2024, divers travaux de construction sont en cours et ceux-ci sont réalisés majoritairement à l'intérieur du bâtiment. Plusieurs employeurs sous-traitants sont sur le chantier. Environ 100 travailleurs y sont présents.

À l'extérieur, des travaux de maçonnerie sont en cours, mais ils sont pratiquement terminés. Ceux-ci ont débuté au mois de juillet 2023 et ils sont effectués par l'entreprise Maçonnerie Gervais et Associés inc. Ils consistent principalement à la pose de blocs de béton à l'intérieur du bâtiment et à l'installation du parement extérieur en brique. Pour la majorité du travail à effectuer, les travailleurs utilisent des unités motorisées de marque Hydro Mobile, modèle M2, de 7,3 m de longueur. Au besoin, des ponts modulaires, fixés en porte-à-faux à l'unité motorisée, sont également utilisés.

L'utilisation d'échafaudages standards sur cadres métalliques est également prévue, selon les besoins sur le chantier.

Au moment de l'accident, les maçons finalisent la mise en place des briques sur la dernière section, en hauteur, du mur sud-est du bâtiment. En raison de la présence d'une marquise à l'extrémité est du mur extérieur, deux unités motorisées sont installées de chaque côté de la marquise. Un pont en appui, composé de cinq ponts modulaires reliés par des plaques de raccord et des boulons, a été déposé sur les deux unités motorisées. Cela permet aux maçons de circuler en hauteur au-dessus de la marquise et de poser les briques.



Fig. 5 - Unités motorisées et pont en appui impliqués dans l'accident
Source: CNESST

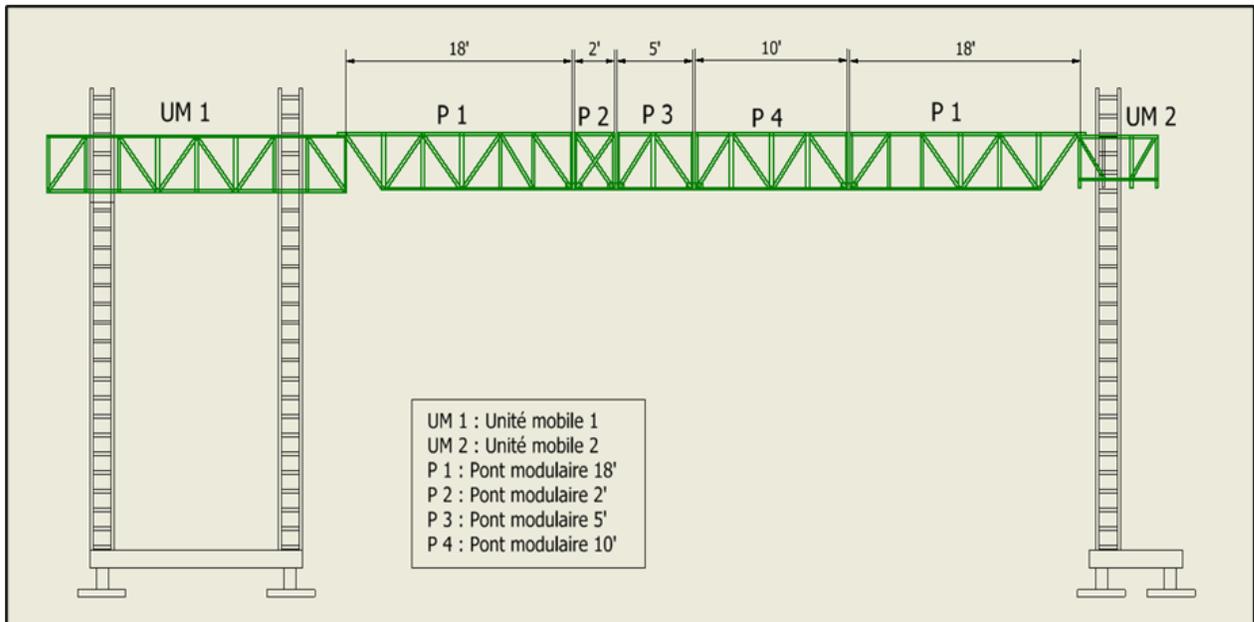


Fig. 6 - Croquis des unités motorisées et du pont en appui impliqués dans l'accident
Source: CNESST

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

En août 2023, les travaux de maçonnerie sont en cours depuis quelques semaines. A de Maçonnerie Gervais et Associés inc. est présent sur le chantier. Il est responsable de l'exécution des travaux de maçonnerie. À ce moment, environ huit maçons travaillent sur le chantier. Dans le but de mettre en place le parement de brique en hauteur, trois unités motorisées sont disponibles. Afin d'augmenter la surface de travail, des ponts modulaires sont sur les lieux et peuvent être fixés, en porte-à-faux et en appui, aux unités motorisées.

Avant l'utilisation des ponts modulaires, A effectue une vérification et constate qu'une membrure sur l'un des ponts est rompue. Après validation auprès de ses supérieurs, il est convenu de faire réparer la membrure par un soudeur d'un employeur présent sur le chantier. Une fois la réparation effectuée, le pont modulaire est utilisé, et ce, tout au long des travaux de maçonnerie. Ceux-ci se poursuivent pendant plusieurs semaines.

En février 2024, la dernière phase des travaux de maçonnerie est en cours. Ceux-ci sont effectués sur le mur arrière à l'extrémité est du bâtiment. Préalablement, des discussions entre les représentants du maître d'œuvre et de l'employeur en maçonnerie ont lieu afin de déterminer la procédure de travail qui doit être mise en place. Celle-ci est nécessaire en raison de la présence de la marquise située à l'extrémité est du mur. Diverses options sont envisagées. Après validation en consultant le manuel du fabricant, l'employeur prend la décision d'installer un pont dont chaque extrémité s'appuie sur une unité motorisée. Cette option permet d'accéder à la partie située au-dessus de la marquise sans affecter l'intégralité de la structure.

Le 21 février 2024, vers 7 h, A et B débutent l'installation des deux unités motorisées aux extrémités de la marquise. Lorsque celles-ci sont en place et que les colonnes sont fixées au bâtiment, les cinq sections de pont sont assemblées à partir du sol. Elles sont ensuite soulevées à l'aide d'un chariot élévateur tout-terrain et déposées en appui sur les unités motorisées. Des chaînes de retenue de sûreté sont accrochées à la structure des unités motorisées. Le montage se termine vers midi, le 23 février 2024.

Le 26 février 2024, vers 7 h, la mise en place du parement de brique au-dessus de la marquise débute. À ce moment, A et cinq maçons sont présents au chantier. Ils débutent par la partie basse du mur qui est située juste au-dessus de la marquise. Les travaux se poursuivent le 27 février 2024 en l'absence de A puisque ce dernier assiste à une formation.

Le 28 février 2024, vers 7 h, les matériaux et les équipements nécessaires à la réalisation des travaux sont déposés sur les unités motorisées et sur le pont en appui. Les travailleurs accèdent au pont et celui-ci est monté jusqu'à la partie supérieure du mur afin d'y finaliser les travaux de maçonnerie. A est toujours absent ce jour-là.

Vers 8 h, au moment où les cinq maçons se trouvent simultanément sur le pont en appui, à environ 7,6 m de hauteur, les membrures inférieures du pont modulaire P-1 cèdent. Cela entraîne un

mouvement du pont, la rupture des chaînes de retenue de sûreté, l'effondrement du pont sur la marquise et la chute des travailleurs.

Les services ambulanciers sont immédiatement appelés et les travailleurs sont secourus. Certains sont transportés au centre hospitalier.

4.2 Constatations et informations recueillies

4.2.1 Unités motorisées utilisées lors de l'accident

Les unités motorisées ont été fabriquées en 2004 par l'entreprise Hydro Mobile. Elles sont de la série M2 et d'une dimension de 7,3 m (24 pi). Ce type d'appareil est fréquemment utilisé sur les chantiers de construction. Il est composé d'une plateforme de travail qui se déplace, en montée et en descente, au moyen d'un système de levage, le long d'une ou de plusieurs colonnes ainsi que d'un système d'amarrage (figure 7).



Fig. 7 - Unité motorisée UM-2
Source : CNESST

Au chantier, lors de l'accident, deux unités motorisées sont installées. Une première unité UM-1 est installée directement en façade du mur sud tandis qu'une deuxième unité UM-2 est placée au coin des murs sud-est.

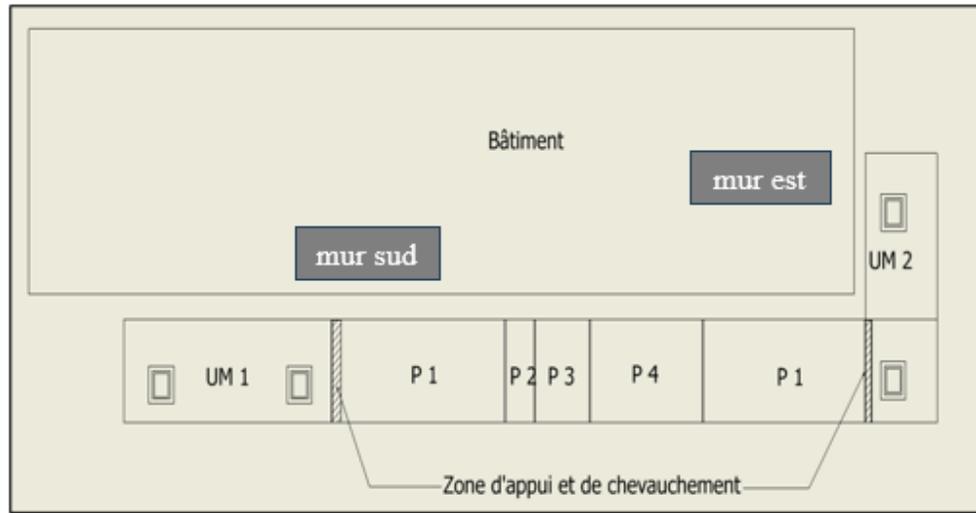


Fig. 8 - Croquis de l'installation au moment de l'accident
Source: CNESST

L'unité motorisée UM-1 et les ponts modulaires P1, P2, P3 et P4 sont munis d'une protection contre les intempéries. Pour l'unité motorisée UM-1, les deux colonnes sont amarrées au bâtiment à 6 m de hauteur.

Pour l'unité motorisée UM-2, la colonne de gauche est amarrée à un seul endroit, soit à 3 m de la structure de la marquise. Pour la colonne de droite, elle est amarrée à un premier niveau de 3 m de hauteur et 3 m plus haut, soit à 6 m.

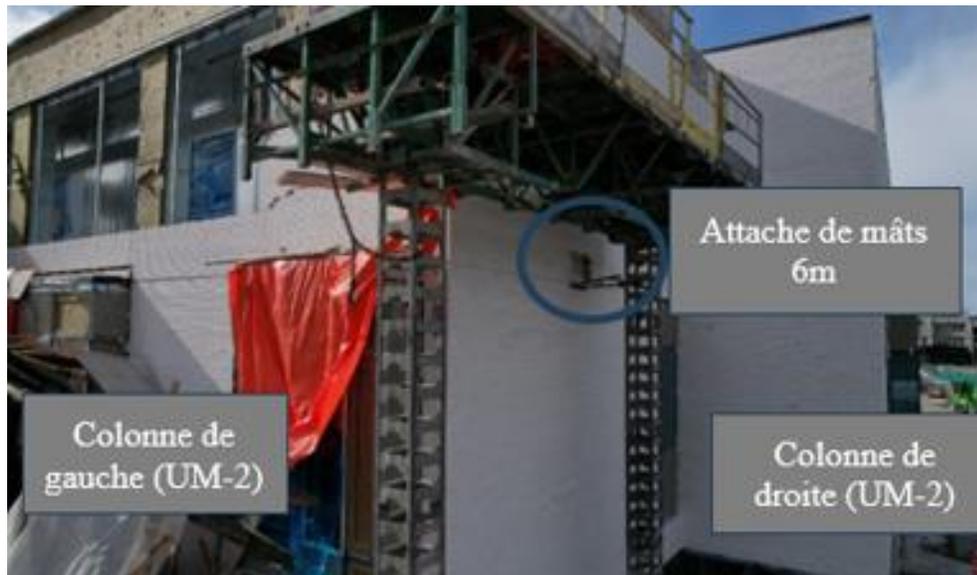


Fig. 9 - Amarrage de l'unité motorisée UM-2
Source : CNESST

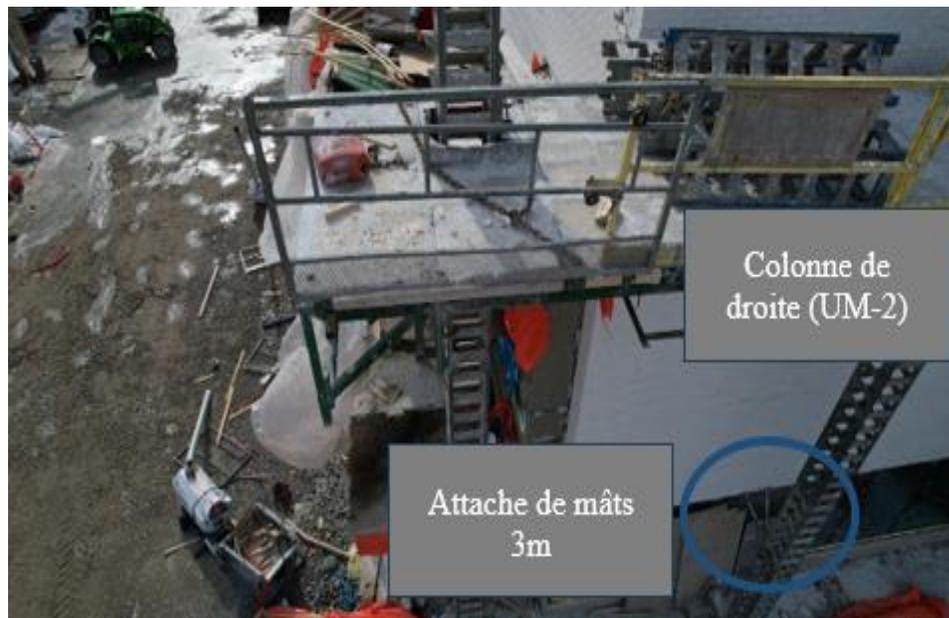


Fig. 10 - Amarrage de l'unité motorisée UM-2
Source : CNESST



Fig. 11 - Amarrage de l'unité motorisée UM-2
Source : CNESST

Le montage ainsi que le démontage des unités motorisées et du pont en appui ont été réalisés par A et B. Ces derniers ont été formés à cet effet par un fournisseur de services autorisé par le fabricant.

Pour l'utilisation et l'opération des unités motorisées, un seul travailleur est formé au moment de l'accident.

Voici les derniers rapports d'inspection des unités motorisées :

Unité motorisée	Inspection quotidienne et périodique	Examen visuel des soudures et de la structure	Examen non destructif de la structure
#3570 (UM-2)	2022	2020-2021-2022	2019
#3518 (UM-1)	2021	2020-2021-2022	2020

Fig. 12 - Tableau – Inspections des unités motorisées
Source : CNESST

4.2.2 Ponts modulaires positionnés en appui

Au chantier, cinq ponts modulaires ont été assemblés et installés en appui sur les unités motorisées UM-1 et UM-2 (figure 6). Celles-ci sont positionnées au coin sud-est du mur arrière du bâtiment.

Deux ponts P-1 sont disposés aux extrémités et appuyés par chevauchement direct sur les unités motorisées. La configuration en forme de demi-pont de l'une des extrémités du pont P-1 permet l'appui direct sur les unités motorisées.



Fig. 13 - Demi-pont dont l'extrémité s'appuie sur l'unité motorisée
Source: Manuel du fabricant

Le pont P-2 à usages multiples (MPI) permet une grande variété d'utilisations afin de compléter un pont, soit en porte-à-faux ou en appui.



Fig. 14 - *Pont à usages multiples*
Source: Manuel du fabricant

Les ponts P-3 et P-4 sont des ponts standards, mais de dimensions différentes.



Fig. 15 - *Pont modulaire*
Source: Manuel du fabricant

Ponts modulaires	Longueur (m)	Année de fabrication
P1-rompu (18B5772M2)	5,5	2002
P1 (18B8827M2)	5,5	2007
P2 (EXT02-1096)	0,6	2016
P3 (5BM2-175)	1,5	2014
P4 (10NB7380M2)	3,0	2004

Fig. 16 - *Tableau – Information sur les ponts modulaires*
Source : CNESST

Il est à noter que les ponts modulaires P-1 et P-4 sont des ponts d'ancienne génération. Ceux-ci peuvent tout de même être assemblés avec des ponts de nouvelle génération puisque le système d'assemblage, composé de plaques de liaison et de goupilles, est le même.

Un pont en appui simple est l'assemblage d'une section de pont entre deux unités motorisées. Un pont en porte-à-faux est l'assemblage d'un pont à une extrémité d'une unité motorisée.

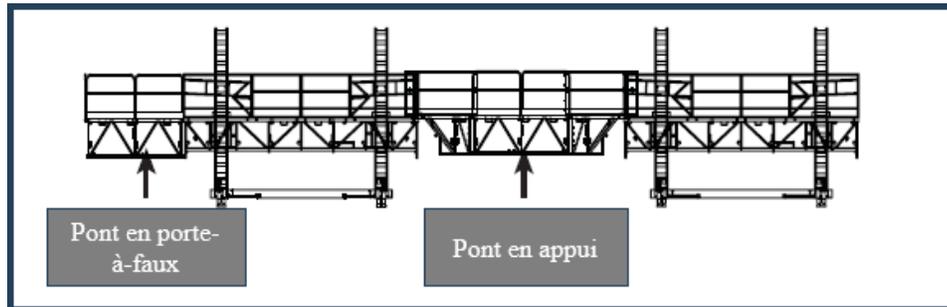


Fig. 17 - Pont en appui et pont en porte-à-faux
Source : Manuel du fabricant, modifié par la CNESST

Les inspections visuelles sont effectuées sur les ponts modulaires en chantier et en atelier, mais elles ne sont pas documentées.

4.2.2.1 Installation d'un pont positionné en appui

Les sections des ponts doivent être préalablement attachées ensemble au moyen de boulons pour joindre la partie supérieure des ponts et d'un ensemble de goupilles et de plaques de liaison pour la partie inférieure.

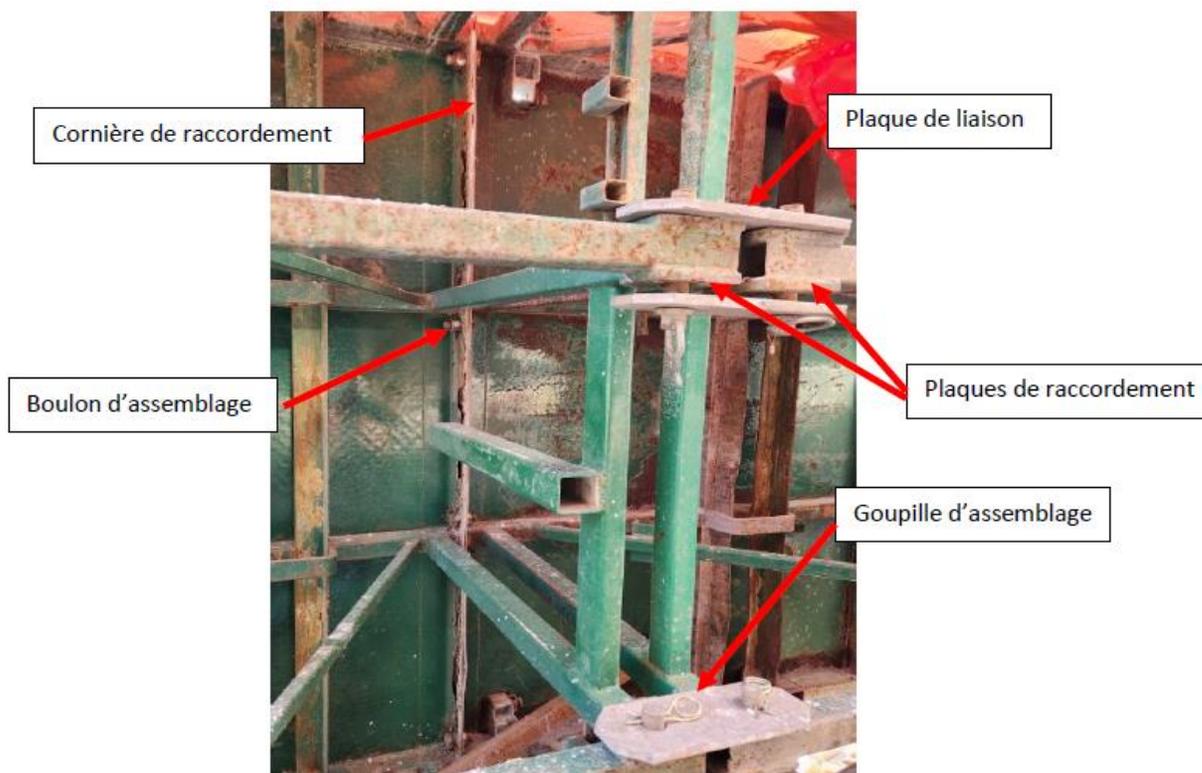


Fig. 18 - Raccordement des ponts en appui
Source : CNESST

Lorsque les sections du pont sont réunies, celui-ci est soulevé et déposé sur les unités motorisées en s'assurant que le chevauchement est adéquat aux deux extrémités. Un chevauchement entre 15 et 30 cm doit être assuré sur les unités motorisées dans le cas d'une configuration en appui simple, mais de 30 cm dans le cas d'une configuration en coin.

Une fois le pont appuyé, les chaînes de retenue de sûreté doivent être fixées. Celles-ci servent à éviter un glissement léger du pont pendant l'utilisation. Toutefois, elles ne peuvent servir à retenir un pont en cas d'effondrement.

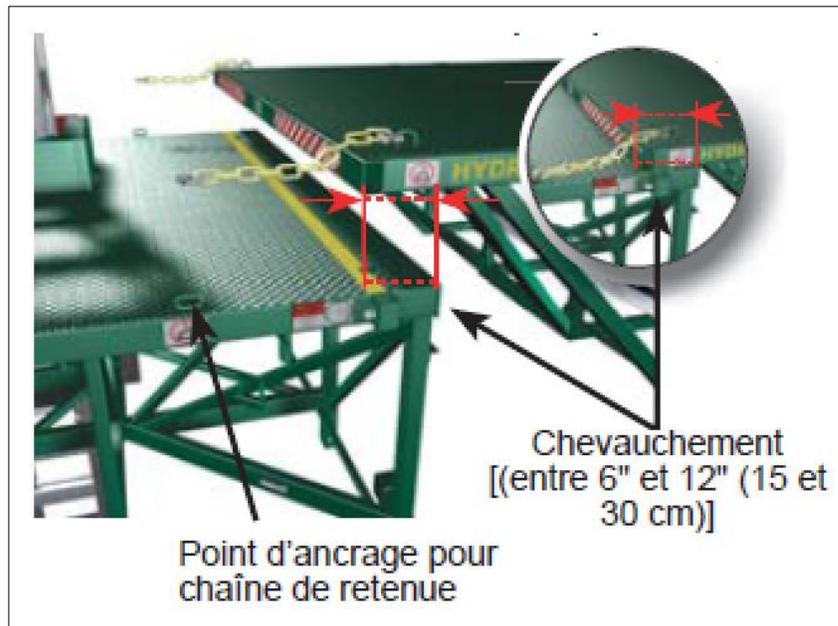


Fig. 19 - Chaîne de retenue de sûreté du pont en appui simple
Source : Manuel du fabricant

4.2.2.2 Rupture des membrures du pont

Le pont en appui s'est effondré à la suite de la rupture de quatre membrures de la section P1 (figure 20). En effet, les quatre membrures inférieures du pont sont scindées en deux à proximité de la jonction entre les sections P1 et P2.



Fig. 20 - Zone de rupture
Source : CEP Forensique

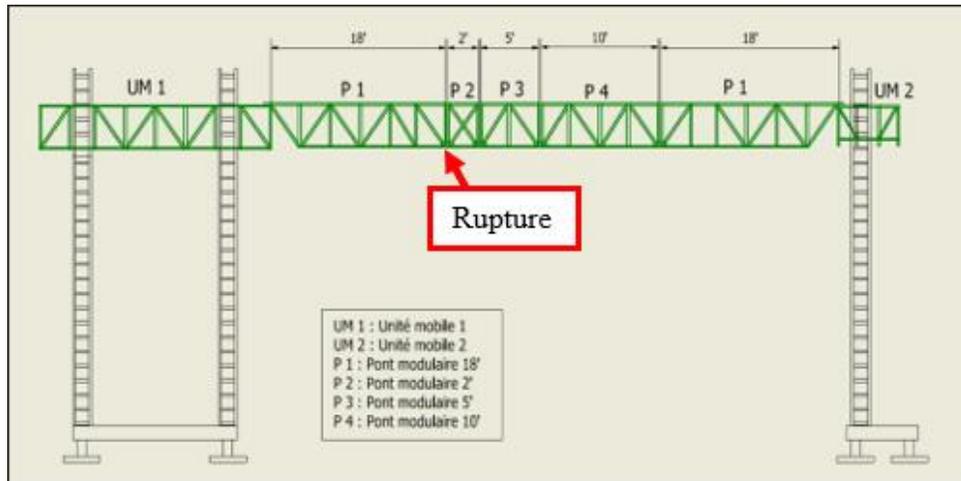


Fig. 21 - Localisation de la rupture des membrures

Source : CNESST

La CNESST a mandaté la firme CEP Forensique afin d'émettre une opinion technique liée à la métallurgie concernant le bris des membrures (Annexe B). En résumé, les membrures 1 à 4 présentent des signes de corrosion à l'intérieur du profilé (figures 22, 23 et 24). Le processus de corrosion est avancé, diminuant l'épaisseur du profilé. À cet effet, l'épaisseur des profilés des membrures 1 à 4 varie de 0,85 à 2,1 mm. De plus, des perforations associées à la corrosion de l'acier sont visibles sur ces membrures. Il est à noter que l'épaisseur d'origine des membrures est de 3,175 mm. L'examen de la membrure 4 démontre que celle-ci a été soudée. En effet, une soudure au pourtour du profilé reliait deux sections de la membrure. Le bris de ce profilé a lieu au niveau de la soudure (figure 25).



Fig. 22 - Membrure 1 corrodée et rompue

Source : CNESST



Fig. 23 - Membrane 2 corrodée et rompue
Source : CNESST



Fig. 24 - Membrane 3 corrodée et rompue
Source : CNESST



Fig. 25 - Membrane 4 soudée et rompue
Source : CNESST

L'experte de la firme CEP Forensique émet les conclusions suivantes :

1. [...]
2. *Les membrures inférieures de la section 1 étaient affectées par l'amincissement d'épaisseur du profilé, généré par une corrosion généralisée de l'acier exposé aux intempéries;*
3. *La membrure 4 de la section 1 aurait été soudée sans préparation de surface au préalable, ce qui a mené à un manque de fusion entre le cordon de soudure et le métal de base. En d'autres mots, la soudure ne respectait pas les règles de l'art et par conséquent ne supportait pas mécaniquement la structure.*
4. *Nous sommes d'avis que le manque d'entretien adéquat et l'utilisation d'une section comportant des signes de corrosion visible, telle que les perforations décelées lors de notre examen, associé à la soudure inadéquate de la membrure 4, ont été la cause de la défaillance et par conséquent de l'accident impliquant le pont de l'échafaudage [sic].*

4.2.2.3 Charge présente sur le pont au moment de son effondrement

Selon le rapport d'expertise de M. Hussein Elahmed, ingénieur et conseiller en prévention-inspection à la CNESST, la charge présente sur la partie B est d'environ 2 033 kg (4 481 lb).

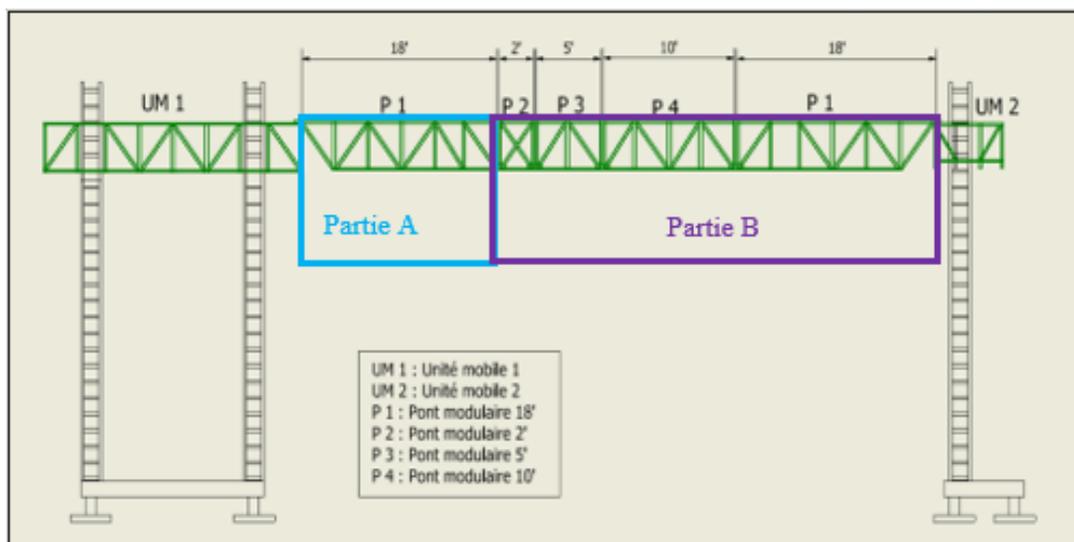


Fig. 26 - Croquis des parties A et B

Source : CNESST

Charges sur la partie B	Poids en kg (lb)
Quatre travailleurs et outils	500 kg (1 100 lb)
Deux palettes de briques	860 kg (1 896 lb)
Structure de protection	493 kg (1 087 lb)
Madriers	180 kg (397 lb)
Total	2 033 kg (4 481 lb)

Fig. 27 - Tableau – Charges sur la partie B
Source : CNESST

4.2.2.4 Rapport sur les facteurs possibles de l'effondrement d'un pont d'échafaudage

La CNESST a mandaté M. Hussein Elahmed, ingénieur et conseiller en prévention-inspection à la CNESST, pour déterminer les facteurs possibles de l'effondrement du pont d'échafaudage. Ce rapport est présenté à l'annexe D.

Voici des extraits de son rapport :

[...] En plus de l'amincissement de l'épaisseur sous l'effet de la corrosion, la quatrième membrure est rompue à cause d'une soudure qui ne supportait pas mécaniquement la structure. Même en négligeant la faiblesse au niveau de la soudure, la résistance totale des quatre membrures était inférieure à la force de traction.

[...]

En règle générale, les membrures inférieures sont davantage susceptibles de subir les effets de la corrosion que les autres membrures de la structure. Elles sont souvent exposées aux intempéries lors de l'utilisation du pont. De plus, elles sont en contact avec le sol durant leur entreposage. En conséquence, il est prévisible que leur dégradation due à la corrosion soit plus avancée par rapport aux autres membrures. [...]

En considérant l'effet de la corrosion sur les membrures inférieures du pont P-1 et en estimant la résistance de celles-ci tout en négligeant la faiblesse de la soudure de la membrure 4, la résistance a été calculée à 123 kN.

En utilisant l'équation du rapport d'expertise pour calculer la résistance en traction d'une section brute (non corrodée) d'une membrure inférieure, la résistance est établie à 164 kN, ce qui totalise 656 kN pour les quatre membrures (figure 28).

Théoriquement, la résistance en traction d'une section d'une membrure de type HSS 51 x 51 x 3.2, est calculée par l'équation suivante :

$$R = \phi * A_g * F_y$$

ϕ = Coefficient de tenu en service = 0,9

A_g = Aire de la section transversale = 528 mm² (HSC 2011)

F_y = Limite élastique de l'acier = 345 MPa, (nuance ASTM A500 – C)

Fig. 28 - Équation de la résistance en traction d'une membrure
Source : CNESST

La force de traction sur les membrures inférieures a été calculée afin de la comparer à la résistance de celles-ci. Afin de calculer cette force de traction, le poids des travailleurs avec leurs équipements a été pris en considération. Le calcul inclut également le poids des deux palettes de briques, de la structure de protection, des madriers et de leur structure d'accueil (longrines) ainsi que des ponts modulaires de la partie B. La force de traction a été établie à 134 kN.

4.2.3 Manuel d'instructions du fabricant

4.2.3.1 Version du manuel du fabricant

Hydro Mobile fabrique ce type d'échafaudage depuis 2001. Un manuel du propriétaire est fourni avec l'appareil lors de l'achat d'une unité neuve. Ce manuel a été bonifié et mis à jour au fil du temps. La version la plus récente remonte à 2017. Il s'agit de la version 5.02. Cette version du manuel s'applique aux unités M2-24 portant les numéros de série 24M 5157 M2 et suivants. Au chantier, les unités motorisées utilisées ont été fabriquées en 2004. Par conséquent, la version 3.1 de 2004 est la version officielle applicable pour les unités motorisées présentes au chantier. Cependant, le fabricant est d'avis que la dernière version 5.02 peut être utilisée pour une unité motorisée fabriquée en 2004 dans la mesure où cette version est la seule utilisée comme référence. La version 5.02 est donc le document de référence utilisé dans le cadre de ce rapport. Il est à noter également que celle-ci est la version utilisée par l'employeur pour l'installation au chantier.

4.2.3.2 Exigences du fabricant quant à l'utilisation d'un pont positionné en appui

Les unités motorisées peuvent être utilisées dans des configurations pour pont en appui simple ou alternatif afin d'adapter les installations à divers types de structures comme lors de l'installation du parement de brique sur un mur en coin. L'installation d'un pont en appui en coin (configuration alternative) consiste à la mise en place de la structure de pont entre deux unités motorisées installées à un angle de 90° l'une de l'autre.

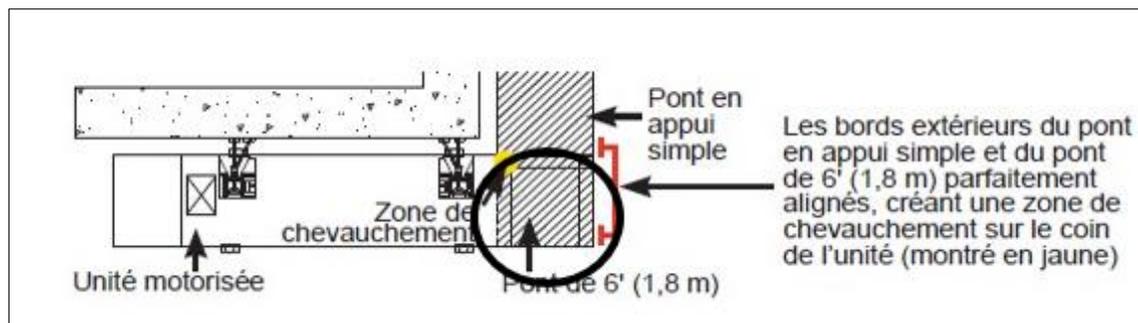


Fig. 29 - Adaptateur de pont pour configuration « en coin »

Source : Manuel du fabricant, modifié par la CNESST

Lors de l'installation d'un pont en appui en coin, le fabricant prévoit l'utilisation d'un adaptateur de pont de 1,8 m à l'extrémité de l'unité motorisée. Celle-ci est chevauchée en coin par le pont en appui. Les adaptateurs de pont permettent une fixation stable du pont en appui, facilitent le chevauchement entre le pont et l'unité motorisée en coin, facilitent la fixation des chaînes de retenue de sûreté et simplifient l'amarrage des colonnes.

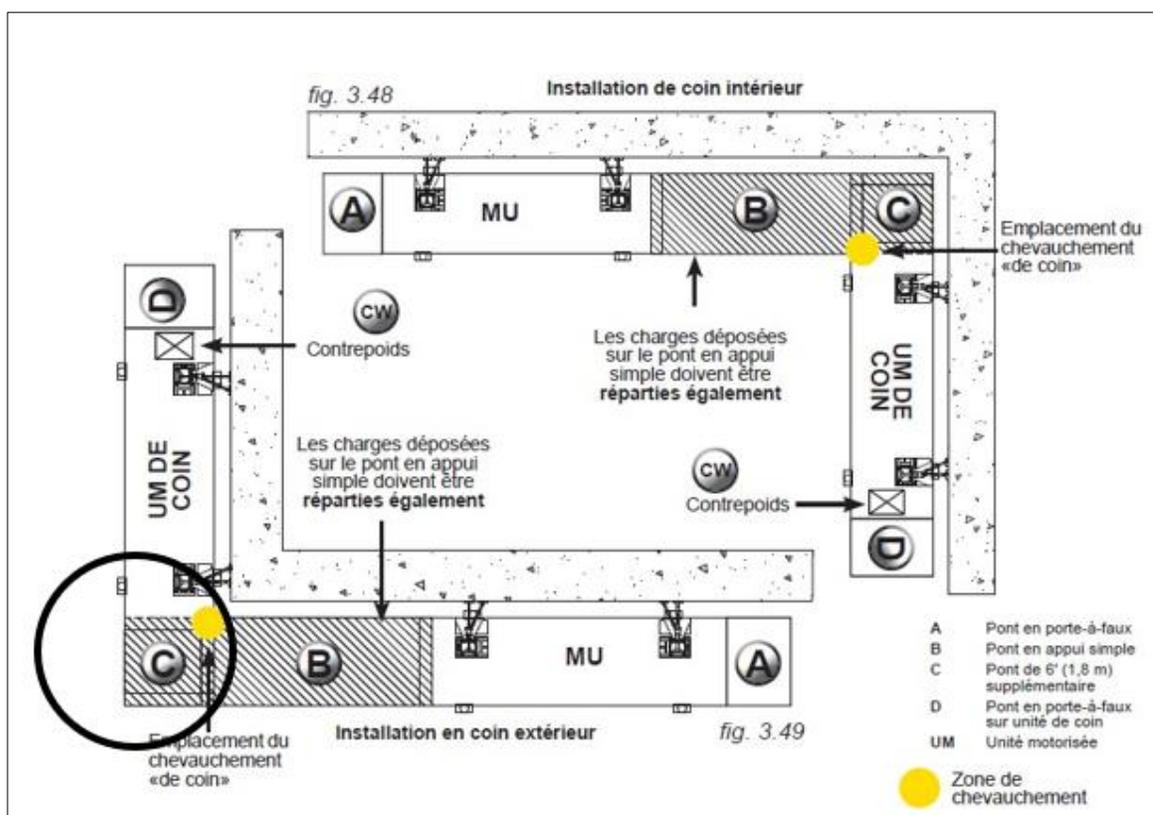


Fig. 30 - Chevauchement - Pont en appui « en coin »

Source : Manuel du fabricant, modifié par la CNESST

4.2.3.3 Exigences du fabricant quant à l'amarrage

Deux types de configuration sont prévus par le fabricant : une configuration standard ou non standard. Une configuration standard ne nécessite pas l'utilisation d'équipements supplémentaires tels qu'un pont de rallonge frontale, un pont pivotant ou une configuration de madriers comportant plus de quatre madriers. De plus, elle ne nécessite pas l'utilisation d'accessoires tels que la protection contre les intempéries, un palan ou un monorail.

Dépendamment de la configuration nécessaire au chantier, deux types d'installation sont possibles : en autoportance ou avec attaches de colonne. La mise en place d'une installation comportant des attaches de colonne, autant en configuration standard que non standard, peut être réalisée selon une méthode progressive ou en effectuant, avant le début des travaux, la préinstallation complète des niveaux d'attaches. Les configurations non standards ne sont pas permises pour les installations en autoportance.

Au chantier, l'unité motorisée UM-1 et le pont en appui sont munis d'une protection contre les intempéries. Cela fait en sorte que l'installation est non standard et qu'elle doit comporter des attaches de colonne respectant les exigences du fabricant quant à leur nombre et à leur espacement. Dans le cas où les niveaux d'attaches sont préinstallés jusqu'au sommet du bâtiment, ils doivent être espacés de 6 m.

Le fabricant prévoit également que, pour une installation non standard, le plancher de l'unité motorisée ne doit pas dépasser 3 m du dernier niveau d'attache.

4.2.3.4 Capacité du pont en appui

Le fabricant prévoit différents diagrammes de capacités de charge selon le modèle de l'unité motorisée, la hauteur à laquelle celle-ci sera déployée, l'ajout de ponts en porte-à-faux et en appui ainsi que la configuration de l'installation. Le poids des madriers, des accessoires utilisés, des travailleurs et de leurs outils doit être calculé dans la charge supportée par les unités motorisées.

Il est à noter que le fabricant prévoit que les diagrammes de capacités de charge, inclus dans la dernière version du manuel du fabricant, sont valables pour les installations comportant des ponts d'anciennes et de nouvelles générations de même qu'une combinaison des deux.

Au moment de l'accident, une configuration en coin avait été mise en place afin de finaliser la pose du parement de brique au-dessus de la marquise. Pour ce type de configuration, les capacités de charge sont illustrées à la figure 31.

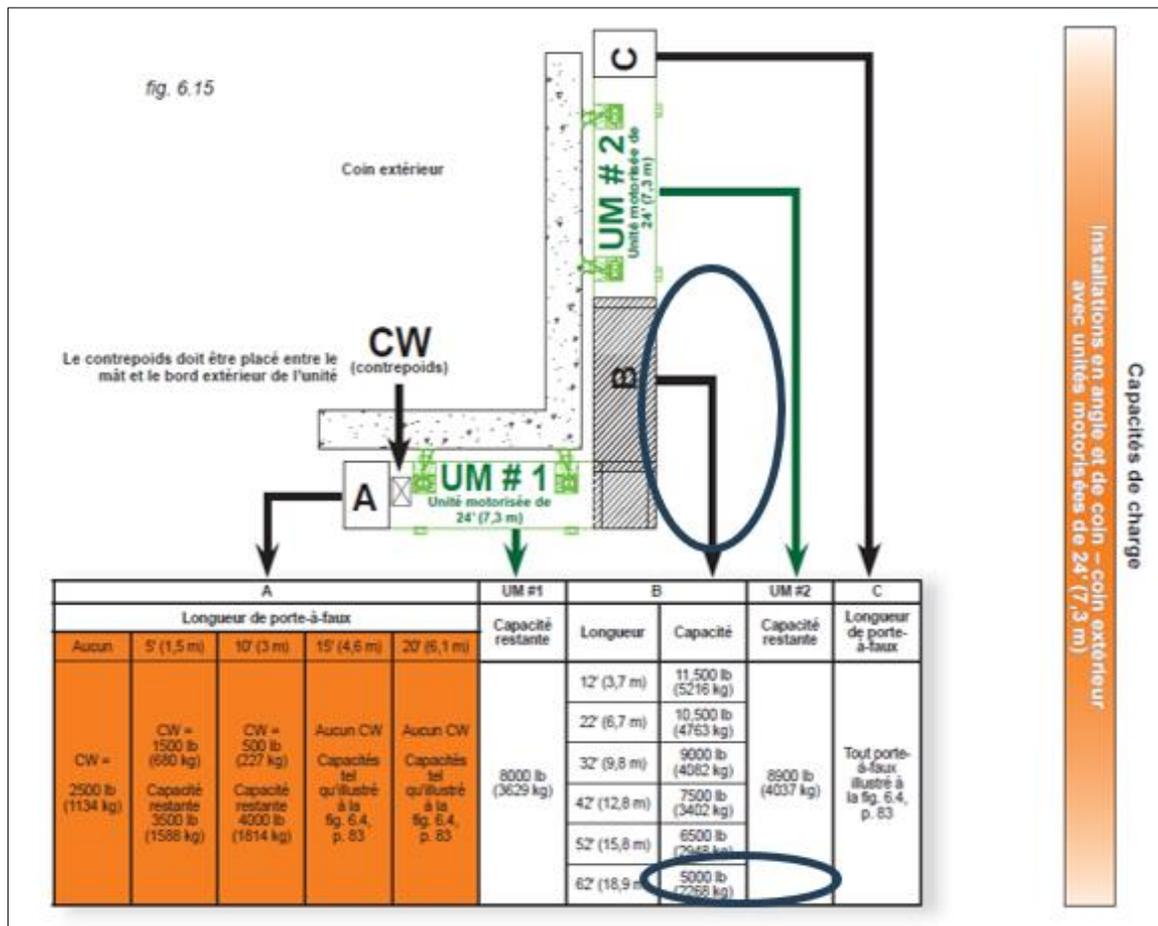


Fig. 31 - Capacités de charge
Source: Manuel du fabricant, modifié par la CNESST

Afin de déterminer la capacité de charge d'une configuration qui n'est pas incluse dans les diagrammes du manuel du fabricant (comme un pont de 16,2 m), celui-ci réfère aux capacités de charge du pont inclus dans le diagramme dont la longueur est supérieure à celle du pont qui doit être installé. Pour une configuration extérieure en coin, avec un pont en appui de 16,2 m, la capacité maximale est de 2 268 kg (5 000 lb).

4.2.3.5 Exigences quant à l'inspection des unités motorisées

Le fabricant prévoit une inspection régulière, quotidienne, hebdomadaire, tous les trois mois (fréquente) et annuelle des unités motorisées et de ses accessoires. Des listes de vérification sont élaborées par le fabricant et comprennent les éléments précis pour chaque type d'inspection.

Une procédure spécifique d'inspection structurale est également prévue par le fabricant et présente les directives à suivre. Le fabricant prévoit quatre types d'inspection structurale : quotidienne, tous les trois mois (fréquente), annuelle et après 10 ans.

4.2.3.6 Exigences quant à l'inspection et la réparation des ponts modulaires

Le fabricant prévoit que les ponts modulaires soient soumis à une inspection régulière tous les trois mois (fréquente) et annuellement. Des listes de vérification d'inspection spécifiques ont été élaborées par le fabricant. Considérant que les ponts modulaires sont des structures devant supporter des charges, le fabricant prévoit une procédure spécifique d'inspection structurale pour les ponts modulaires. Quatre types d'inspection structurale sont prévues : quotidienne, tous les trois mois (fréquente), annuelle et après 10 ans par contrôle de l'épaisseur à l'ultrason.

Le fabricant a clairement identifié, dans sa procédure d'inspection et d'entretien des ponts modulaires, les zones critiques devant être contrôlées afin de déterminer l'intégrité de la structure par un contrôle de l'épaisseur à l'ultrason.

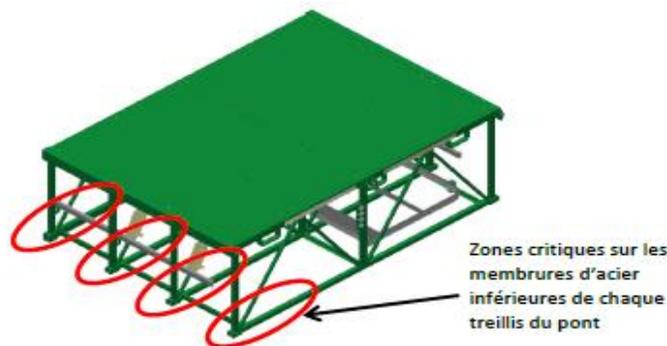


Fig. 32 - Zones critiques sur les membrures
Source: Procédure HMT-0176-04-F, Hydro Mobile

Le fabricant a prévu une procédure d'inspection structurale spécifique et détaillée (HTM-0176-04-F) pour les ponts d'ancienne génération. Entre autres, il prévoit les critères par rapport à l'inspection structurale 10 ans après la date de fabrication (figure 33).

- d. **Inspection après 10 ans:** Toute structure datant de plus de dix (10) ans doit être soumise à un contrôle d'épaisseur à l'ultrason effectué par une personne ou une entité qualifiée afin de déterminer si l'intégrité de la structure satisfait aux exigences minimales d'Hydro Mobile. Suite aux résultats du contrôle à l'ultrason, il faut effectuer les tests subséquents selon les critères prévus.

CRITÈRES POUR LES CONTRÔLES SUBSÉQUENTS	
Lecture de l'épaisseur minimale	Action
Plus de 0.1125 po (2,86 mm)	Nouveau contrôle 5 ans après la date du contrôle
Entre 0.106 po (2,69 mm) et 0.111 po (2,81 mm)	Nouveau contrôle 2 ans après la date du contrôle
Entre 0.100 po (2,54 mm) et 0.105 in (2,66 mm)	Nouveau contrôle 1 an après la date du contrôle
Moins de 0.100 po (2,54 mm)	L'équipement doit être mis hors service

Fig. 33 - Critères pour le contrôle des ponts

Source: Procédure HTM-0176-04-F, Hydro Mobile

À la suite des inspections structurales exigées par le fabricant et dans la mesure où des réparations sont nécessaires, le fabricant prévoit également une procédure de réparation structurale spécifique pour les membrures inférieures des ponts d'ancienne génération (HMT-0174-03-F). Cette procédure vise à fournir les lignes directrices et la méthode pour effectuer la réparation des ponts.

Le fabricant prévoit, avant d'entreprendre une réparation, d'inspecter rigoureusement le pont modulaire et de mesurer l'épaisseur du matériel en vertu de la procédure HMT-0176-04-F. Dans le cas où une section du pont présente des dommages importants ou est endommagée à un point tel qu'elle ne pourrait être réparée de manière à la rendre conforme, le pont doit alors être mis hors service de façon permanente et détruit.

Le fabricant prévoit une méthode de réparation privilégiée lorsque la mesure de l'épaisseur des membrures inférieures établit une valeur de 2,54 mm (0,100 po), tel que prévu dans la procédure HMT-0174-03-F. Toute portion de la membrure inférieure dont la mesure est sous la valeur minimale doit être retirée entièrement, depuis l'extrémité du pont où se situent les plaques de raccordement jusqu'au centre de la zone suivante. Lorsqu'une jonction doit être effectuée dans une zone près de l'extrémité en angle du pont (zone D) d'un pont de 5,5 m (18 pi), la méthode précise que la membrure inférieure doit être remplacée au complet.

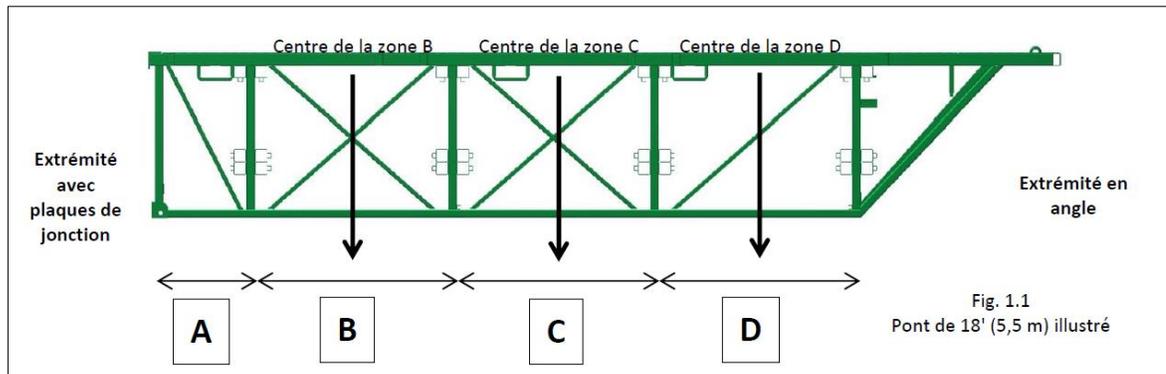


Fig. 34 - Réparation structurale
Source : Procédure HMT-0174-03-F, Hydro Mobile

4.2.3.7 Exigences quant à la formation

Dans son manuel, le fabricant précise les exigences quant à la formation et aux compétences des travailleurs affectés au montage et au démontage d'une unité motorisée. Ces opérations doivent être exécutées en vertu des consignes, instructions et avertissements inclus dans le manuel et effectuées par des monteurs/démonteurs qualifiés sous la supervision d'une personne compétente. Pour les opérations de manœuvre d'une unité motorisée, le fabricant recommande qu'il y ait deux personnes sur place pour chacune des unités motorisées d'une installation et qu'au moins une de ces deux personnes soit un opérateur qualifié. Donc, pour une installation avec deux unités motorisées, deux opérateurs qualifiés sont nécessaires.

4.2.4 Loi, réglementation et règles de l'art

4.2.4.1 Loi sur la santé et la sécurité du travail (LSST)

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;*
[...]

5 ° *utiliser les méthodes et techniques visant à identifier, contrôler et éliminer les risques pouvant affecter la santé et la sécurité du travailleur;*
[...]

7 ° *fournir un matériel sécuritaire et assurer son maintien en bon état;*
[...]

4.2.4.2 Code de sécurité pour les travaux de construction (CSTC)

Le Code CSTC encadre les exigences réglementaires propres aux chantiers de construction.
[...]

Article 1.1.14.2 Définitions : « échafaudage à tour et à plate-forme » : un échafaudage constitué d'une plate-forme de travail qui se déplace, en montée et en descente au moyen d'un système de levage, le long d'une ou de plusieurs colonnes ainsi que d'un système d'amarrage
[...]

Article 2.4.1.2 Obligations générales : Avant la mise en œuvre des travaux mentionnés ci-dessous, l'employeur doit transmettre à la Commission les plans, incluant les procédés d'installation et de démontage, signés et scellés par un ingénieur du fabricant :
[...]

m) d'un échafaudage à tour et à plate-forme qui doit être amarré, sauf s'il s'agit d'un échafaudage à crics.
[...]

Article 3.9.3. Matériaux : Les matériaux utilisés pour un échafaudage ne doivent pas présenter de défaut de nature à diminuer leur résistance.
[...]

3. Les parties métalliques d'un échafaudage ne doivent pas :

a) être affaiblies par la rouille, ni par l'action d'un corrodant; et
[...]

Article 3.9.22. Échafaudage à tour et plate-forme : Tout échafaudage à tour et à plate-forme doit :

1° être conçu conformément aux plans d'un ingénieur et une copie de ces plans doit être disponible sur demande;
[...]

7° être chargé conformément aux plans de l'ingénieur ou au manuel du fabricant qui doivent notamment identifier les zones de chargement;

8° avoir des colonnes amarrées à la hauteur et au moyen d'un système d'amarrage conformes aux plans de l'ingénieur ou au manuel du fabricant;

9° être pourvu d'un système d'amarrage prévu à cette fin conformément aux plans de l'ingénieur ou au manuel du fabricant lorsque des toiles de protection y sont installées;

10° être utilisé par des travailleurs qui ont reçu une formation qui les rend aptes à :

a) identifier et prévenir les dangers reliés au montage, au démontage et à l'utilisation de l'échafaudage;

b) y travailler de façon sécuritaire.
[...]

Article 3.9.25. Échafaudage motorisé : Outre les normes prévues à l'article 3.9.22, tout échafaudage motorisé fabriqué à compter du 13 mars 2008 doit :

*1° être conçu et fabriqué conformément à la norme Matériels de mise à niveau - Plates-formes de travail se déplaçant le long de mât(s), ISO 16369, ou à la norme Conception, calculs, exigences relatives à la sécurité et méthodes d'essai pour des plates-formes de travail élévatrices (MCWP), CSA B354.9 applicable au moment de la fabrication;
[...]*

5° outre les instructions du fabricant, être inspecté conformément aux modalités de la norme Usage sécuritaire et meilleures méthodes pour les plates-formes de travail se déplaçant le long de mâts (MCWP) / Formation reliée aux plates-formes de travail se déplaçant le long de mâts (MCWP), CSA B354.10/CSA B354.11 et selon les fréquences suivantes :

a) avant chaque utilisation;

b) selon la première échéance, à tous les 6 mois ou à toutes les 120 heures d'utilisation par un mécanicien qualifié;

6° être soumis, à tous les ans, à un examen visuel des soudures effectué par une personne détenant depuis au moins 5 ans un certificat délivré par le Bureau canadien de soudage ou par un superviseur en soudage à l'emploi d'une compagnie certifiée en vertu des exigences de la norme Certification des compagnies de soudage par fusion des structures en acier, CSA W47.1.

Un document confirmant l'examen doit être conservé. Ce document doit contenir le nom et la signature de l'examineur ainsi que la date de l'examen.

Dans les cas où l'examen décèle une anomalie ou un signe d'usure, l'examen prévu au paragraphe 7 doit être effectué avant que l'échafaudage motorisé puisse être à nouveau utilisé.

7° Être soumis, dans un délai maximal de 10 ans après la date de fabrication, et, par la suite, minimalement à tous les 5 ans, à un examen non destructif des pièces portantes, spécifiées par le manufacturier, conformément aux exigences de la norme Qualification des organismes d'inspection en soudage, CSA W178.1.

La structure doit également être analysée par ultrason.

Un document confirmant l'examen et l'analyse doit être conservé. Ce document doit contenir le nom et la signature de l'examineur ainsi que la date de l'examen.

De plus, un manuel d'instructions de tout échafaudage motorisé, rédigé en français et complet, doit être mis à la disposition des utilisateurs afin de permettre un usage sécuritaire de l'échafaudage.

Les deux unités motorisées, utilisées au chantier lors de l'accident, ont été fabriquées en 2004. Considérant que l'article 3.9.25 du CSTC vise l'inspection des échafaudages motorisés fabriqués à compter du 13 mars 2008, cet article est utilisé comme règle de l'art pour l'inspection des unités motorisées et des ponts modulaires.

4.2.4.3 Norme CSA B354.9 : 17 – Conception, calculs, exigences relatives à la sécurité et méthodes d'essai pour des plates-formes de travail se déplaçant le long de mâts (MCWP)

La section 3 de la norme définit les notions suivantes :

***Extensions de plate-forme** – pièces supplémentaires d'une plate-forme de travail qui sont construites au moyen d'éléments structurels secondaires, dont le soutien et l'emplacement dépendent de la plate-forme principale*

***Plate-forme de travail** – partie mobile verticale de l'installation sur laquelle des personnes, de l'équipement et des matériaux sont transportés et à partir de laquelle un travail est effectué. »*

Notes :

- 1) *Ceci est différent de la MCWP, qui signifie l'ensemble de l'installation, y compris la plate-forme de travail, le mât, les attaches de mâts, la base et le châssis*
- 2) *La plate-forme de travail comprend la plate-forme principale et toutes les extensions de plate-forme.*

***Personnes compétentes** – personne capable d'identifier des dangers existants ou prévisibles dans les environs ou des conditions de travail qui ne sont pas sécuritaires, qui sont risquées ou dangereuses pour les employés et qui a autorité de prendre des mesures correctives rapides pour éliminer ces dangers.*

***Personnes qualifiées** – personne qui, en possession d'un diplôme, certificat, statut professionnel ou par une connaissance, une formation et une expérience étendues a réussi à démontrer sa capacité de résoudre les problèmes liés au sujet en question, au travail ou au projet.*

L'article 6.1.9 de la norme donne les instructions suivantes relativement à l'entretien :

[...]

Le fabricant doit souligner que l'entretien régulier doit comprendre une inspection visuelle et tous les essais fonctionnels et les mesures d'entretien nécessaires. Une attention particulière devra être accordées à l'inspection des pièces soumises à des charges avec des attaches, des dispositifs d'entraînement et d'arrêt, des dispositifs d'utilisation et de sécurité, des pignons et des crémaillères, etc.

4.3 Énoncés et analyse des causes

4.3.1 La rupture des membrures inférieures du pont modulaire P-1 entraîne l'effondrement du pont en appui et la chute des maçons.

Afin de permettre la pose du parement de brique au-dessus de la marquise, l'employeur décide d'installer un pont en appui de 16,2 m entre deux unités motorisées. Celui-ci est composé de cinq sections de pont reliées entre elles, dont les extrémités s'appuient par chevauchement sur les unités motorisées. Des chaînes de retenue de sûreté sont fixées entre les ponts d'extrémité et les unités motorisées. Elles servent à éviter un léger glissement du pont en cours d'utilisation. Cette option de pont en appui est permise par le fabricant, à condition de respecter les directives d'installation et les consignes de sécurité associées.

Le jour de l'accident, vers 8 h, au moment où les 5 maçons se trouvent simultanément sur le pont en appui, à environ 7,6 m de hauteur, les membrures inférieures du pont modulaire P-1 cèdent, créent un mouvement du pont, la rupture des chaînes de retenue de sûreté, l'effondrement du pont sur la marquise et la chute des travailleurs.

Cette cause est retenue

4.3.2 La force de traction exercée sur les membrures inférieures du pont modulaire P-1 excède leur résistance qui est considérablement réduite sous l'effet de la corrosion avancée des profilés d'acier.

Les quatre membrures inférieures du pont modulaire P-1 présentaient un important amincissement de leur profilé d'acier dû à la corrosion, à un point tel que des perforations étaient visibles. La corrosion avancée des profilés d'acier avait réduit l'épaisseur des membrures 1 à 4 à des valeurs comprises entre 0,85 et 2,1 mm alors que l'épaisseur d'origine était de 3,175 mm. La résistance en traction d'une section brute (non corrodée) des 4 membrures inférieures est de 656 kN.

En plus d'être corrodée, la quatrième membrure avait été soudée de manière inadéquate. La soudure ne supportait pas mécaniquement la structure. Même sans tenir compte de cette faiblesse, la résistance totale des 4 membrures était de 123 kN, ce qui correspond à 19 % de la résistance des membrures sans corrosion.

La force de traction exercée sur les 4 membrures est de 134 kN alors que leur résistance totale est de 123 kN. Puisque cette force de traction dépassait la résistance des membrures, cela a entraîné leur rupture, l'effondrement du pont et la chute des travailleurs.

Cette cause est retenue

4.3.3 La gestion déficiente de l'inspection et de l'entretien des ponts modulaires compromet la sécurité des maçons.

Une unité motorisée est composée d'une plateforme de travail principale. À celle-ci, il est possible d'ajouter des extensions (ponts) construites au moyen d'éléments structuraux dont le soutien et l'emplacement dépendent de la plateforme principale. Donc, l'échafaudage motorisé mentionné à l'article 3.9.25 du CSTC comprend les unités motorisées et les ponts modulaires. Les exigences d'inspection et d'entretien prévues dans cet article s'appliquent aussi bien pour les unités motorisées que pour les ponts modulaires. Comme les unités et les ponts modulaires ont été fabriqués avant le 13 mars 2008, cet article peut être utilisé comme règle de l'art.

Le pont modulaire P-1, impliqué dans l'effondrement du pont en appui et étant à l'origine de cet effondrement, a été fabriqué en 2002. Ce type de ponts modulaires est régulièrement monté et démonté en chantier, transporté et entreposé dans des conditions difficiles et utilisé dans le cadre de travaux de construction lourds comme la maçonnerie. Cette utilisation exige de l'employeur non seulement qu'il inspecte régulièrement ses ponts, mais qu'il les répare afin d'en assurer le bon état. L'article 51.7 de la *Loi sur la santé et la sécurité du travail* (LSST) est clair quant à la responsabilité de l'employeur à ce sujet : *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 : fournir un matériel sécuritaire et assurer son maintien en bon état.*

Le fabricant prévoit que les ponts modulaires soient soumis à une inspection régulière aux trois mois et annuellement. Des listes de vérification d'inspection spécifiques ont été élaborées par le fabricant. Considérant que les ponts modulaires sont des structures devant supporter des charges, le fabricant prévoit une procédure spécifique d'inspection structurale pour les ponts modulaires. Le fabricant prévoit quatre types d'inspection structurale, soit quotidienne, tous les trois mois, annuelle et une inspection après 10 ans par contrôle de l'épaisseur à l'ultrason. Ces exigences du fabricant ne sont pas appliquées par l'employeur. De plus, la corrosion avancée des quatre membrures inférieures du pont modulaire P-1 révèle des lacunes significatives dans les procédures d'inspection. Cette corrosion va à l'encontre de l'article 3.9.3 du CSTC qui stipule que les parties métalliques d'un échafaudage ne doivent pas être affaiblies par la rouille ou par l'action d'un corrodant.

L'inspection structurale après 10 ans par contrôle de l'épaisseur à l'ultrason est importante afin de déterminer l'intégrité de la structure devant supporter des travailleurs lors de travaux en hauteur. Pour une lecture d'épaisseur de moins de 2,54 mm (0,1 po), le fabricant prévoit que l'équipement doit être mis hors service. L'opinion technique demandée dans le cadre de l'enquête démontre que l'épaisseur des profilés des membrures 1 à 4 variait de 0,85 à 2,1 mm, (0,03 à 0,08 po). Celle-ci est inférieure à l'épaisseur minimale prévue par le fabricant afin de pouvoir utiliser les ponts.

Au sujet des réparations effectuées sur les ponts, le fabricant prévoit une procédure de réparation structurale spécifique pour les membrures inférieures des ponts d'ancienne génération. Cette procédure vise à fournir les lignes directrices et la méthode pour effectuer la réparation des ponts, et ce, afin d'assurer une utilisation sécuritaire. Cette procédure n'est pas appliquée par l'employeur. L'examen de la membrure 4 du pont P-1, effectué dans le cadre de l'opinion

technique, a démontré qu'une soudure avait été effectuée, en chantier, et que celle-ci ne respectait pas les règles de l'art et, par conséquent, ne supportait pas mécaniquement la structure.

Une inspection rigoureuse des ponts, incluant une inspection structurale, ainsi que l'élaboration d'une procédure de réparation des éléments structuraux, conformément aux exigences du fabricant, auraient permis à l'employeur de maintenir ses ponts en bon état et, ainsi, de fournir un équipement sécuritaire à ses travailleurs.

Cette cause est retenue.

SECTION 5

5 CONCLUSION

5.1 Causes de l'accident

- La rupture des membrures inférieures du pont modulaire P-1 entraîne l'effondrement du pont en appui et la chute des maçons.
- La force de traction exercée sur les membrures inférieures du pont modulaire P-1 excède leur résistance qui est considérablement réduite sous l'effet de la corrosion avancée des profilés d'acier.
- La gestion déficiente de l'inspection et de l'entretien des ponts modulaires compromet la sécurité des maçons.

5.2 Suivis de l'enquête

Pour éviter la répétition d'un accident similaire, la CNESST transmettra les conclusions de son enquête à l'Association de la construction du Québec, l'Association des professionnels de la construction et de l'habitation du Québec, l'Association patronale des entreprises en construction du Québec et l'Association des entrepreneurs en construction du Québec afin que leurs membres en soient informés.

Les conclusions de l'enquête seront également transmises à l'Association des entrepreneurs en maçonnerie du Québec et à l'Association québécoise de l'industrie de l'échafaudage et de l'accès afin que leurs membres en soient informés.

De plus, le rapport d'enquête sera transmis aux associations sectorielles paritaires de même qu'aux gestionnaires de mutuelles de prévention.

Finalement, dans le cadre de son partenariat avec la CNESST visant l'intégration de la santé et de la sécurité dans la formation professionnelle et technique, le ministère de l'Éducation diffusera, à titre informatif et à des fins pédagogiques, le rapport d'enquête dans les établissements de formation offrant le programme d'études professionnelles *Briquetage-maçonnerie*.

6 ANNEXE**ANNEXE A-Accidentés**

Nom, prénom : C [REDACTED]
Sexe : Masculin
Âge : [REDACTED]
Fonction habituelle : [REDACTED]
Fonction lors de l'accident : Maçon
Ancienneté chez l'employeur : [REDACTED]
Syndicat : FTQ-Construction

Nom, prénom : D [REDACTED]
Sexe : Masculin
Âge : [REDACTED]
Fonction habituelle : [REDACTED]
Fonction lors de l'accident : Maçon
Ancienneté chez l'employeur : [REDACTED]
Syndicat : FTQ-Construction

Nom, prénom : E [REDACTED]
Sexe : Masculin
Âge : [REDACTED]
Fonction habituelle : [REDACTED]
Fonction lors de l'accident : Maçon
Ancienneté chez l'employeur : [REDACTED]
Syndicat : FTQ-Construction

Nom, prénom : F [REDACTED]
Sexe : Masculin
Âge : [REDACTED]
Fonction habituelle : [REDACTED]
Fonction lors de l'accident : Maçon
Ancienneté chez l'employeur : [REDACTED]
Syndicat : FTQ-Construction

Nom, prénom : G

Sexe : Masculin

Âge :

Fonction habituelle :

Fonction lors de l'accident : Maçon

Ancienneté chez l'employeur :

Syndicat : FTQ-Construction

ANNEXE B-Sommaire d'investigation liée à la métallurgie



SOMMAIRE D'INVESTIGATION

Notre dossier : 2024-03-0140



Dossier CNESST – Trois-Rivières
Adresse de l'événement 6, rue Fusey
Trois-Rivières (Québec) G8T 2T1

Police : Non applicable

Présenté à Madame Isabelle Émond
CNESST
1199, rue De Bleury, 3^e étage
Montréal (Québec) H3B 3J1

Votre dossier : DPI4380725

Date du rapport 28 mars 2024

Date de perte 28 février 2024

Date du mandat 12 mars 2024

Annexe Photographies (17)



Investigateur

2024-03-28

**Veronica Buss Almeida, ing., M.Sc.,
métallurgiste**
N° membre OIQ : 5030182

Réviseur

2024-03-28

Hugo Julien, ing.,
N° membre OIQ : 119457



Ce sommaire a été rédigé dans le but de vous assister dans la gestion de ce dossier, mais n'a pas été préparé aux fins d'un litige. Nous nous réservons le droit de réviser notre opinion si de nouvelles données devenaient disponibles.

CEP
FORENSIQUE

 Nom du dossier : CNESST – Trois-Rivières
 Notre dossier : 2024-03-0140

MANDAT

Les services de CEP Forensique ont été retenus par madame Isabelle Émond de la CNESST, le 12 mars 2024, afin d'émettre une opinion technique liée à la métallurgie concernant le bris d'un pont d'échafaudage ayant causé des blessures.

MISE EN CONTEXTE

Le 28 février 2024, un pont d'échafaudage s'est effondré, causant des blessures à cinq ouvriers qui s'affairaient à la pose du parement en brique de l'édifice sis au 6, rue Fusey, à Trois-Rivières.

Les informations qui nous ont été rapportées sont comme suit :

- Le bâtiment de trois étages à l'étude était en construction et destiné à abriter une maison pour personnes âgées;
- L'entrepreneur responsable de la construction était EBC inc. qui a sous-traité Maçonnerie Gervais pour la pose du parement;
- L'échafaudage appartenait à Maçonnerie Gervais. Les informations au dossier ne nous permettent pas d'établir les conditions d'entreposage et de l'entretien des unités motorisées et des plateformes formant le pont à l'étude;
- Les unités motorisées de l'échafaudage, de la série M2 24' d'Hydro Mobile, ont été achetées en 2004. Le fabricant ne possède pas de registres des plateformes, ne permettant pas d'établir l'âge de celles impliquées dans les événements;
- Une soudure aurait été réalisée sur chantier au mois d'août 2023. Les informations au dossier ne nous permettent pas d'établir l'identité de la personne/entreprise ayant réalisé cette soudure ou les raisons menant à cette réparation;
- Au moment des événements, il y avait cinq travailleurs sur la plateforme en plus de deux palettes de briques. Par ailleurs, les palettes de briques étaient placées à proximité de la zone de défaillance. Un des travailleurs se trouvait à proximité des palettes, pendant que les quatre autres se trouvaient sur le pont à proximité de l'unité motorisée à droite;
- Personne n'a témoigné de l'incident qui a eu lieu vers 8 heures du matin. Cela dit, nous inférons de la séquence des événements à partir de notre analyse des photographies fournies par la CNESST et des observations lors de notre examen des lieux;
- Nous ne pouvons pas établir si les travailleurs portaient des harnais de sécurité et s'ils étaient attachés à une ligne de vie.

 Nom du dossier : CNESST – Trois-Rivières
 Notre dossier : 2024-03-0140

INVESTIGATION

Examen des photographies émanant de la CNESST

Nous avons reçu une série de photographies prises par drone et fournies par les inspecteurs de la CNESST après les événements. La photographie 1 montre l'échafaudage au complet, les deux unités motorisées (ou mobiles) à gauche et à droite, ainsi que le pont formé par des plateformes. L'échafaudage était placé au troisième étage du bâtiment et des travaux de pose de parement en brique étaient en cours lors des événements. Les extrémités du pont étaient sécurisées, à l'origine, par l'entremise de chaînes attachées aux plateformes des unités motorisées. En effet, les photographies fournies présentaient des maillons de chaînes brisées sur les plateformes des unités mobiles.

Nous comprenons, de la position des plateformes dans la photographie 1, que le bris a eu lieu dans la première section à partir de l'unité motorisée de gauche. Le bris de cette section aurait occasionné le mouvement abrupt vers la gauche de l'unité motorisée à droite. En effet, des signes d'impact au niveau du parement en brique indiquaient que l'unité de droite aurait subi un mouvement soudain, compatible à un traînage de la structure vers la gauche par un surpoids.

Les plateformes ont atterri sur la marquise du bâtiment. En effet, cette marquise aurait limité la chute des plateformes à une hauteur d'environ un étage et demi.

La photographie 2 montre la structure de la première section citée ci-haut. Il est possible de voir que les membrures de support de ladite plateforme ont cédé.

Examen du site

Nous avons examiné les lieux le 15 mars 2024. H [redacted] et I [redacted] [redacted] d'EBC Inc. nous accompagnaient lors de notre examen. De plus, madame Julie Lavoie et monsieur Steve Laperle, tous deux inspecteurs pour la CNESST, et monsieur Hussein Elahmed, conseiller expert pour la CNESST, étaient également présents. Monsieur Elahmed agissait en tant qu'ingénieur en structure.

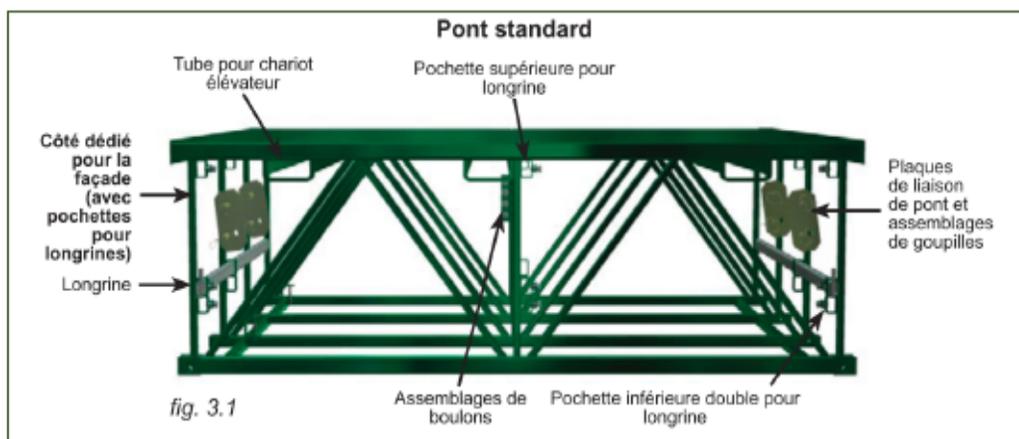
Les plateformes formant le pont de l'échafaudage avaient déjà été enlevées de la marquise et sécurisées au sol avant notre arrivée. Ces plateformes se trouvaient à 90° par rapport à leur position initiale (photographie 3). Plus précisément, les supports du toit faisaient face au sud-est, en direction de la rue, et la structure du pont était positionnée vers le bâtiment. Les plateformes associées aux unités motorisées avaient été enlevées et se trouvaient par terre au niveau de la latérale du bâtiment.

La base des unités motorisées comportait l'inscription Hydro-Mobile, faisant référence au fabricant des équipements (photographie 4).

L'examen des plateformes des unités motorisées a démontré que les sections du pont chevauchaient lesdites plateformes d'au moins 12 pouces (photographie 5), respectant les instructions du fabricant. Des points d'ancrage servant d'attache pour les chaînes sur les deux plateformes examinées étaient brisés (photographie 6). Les maillons brisés des chaînes précitées n'ont pas été conservés et nous n'avons pas pu les examiner.

 Nom du dossier : CNESST – Trois-Rivières
 Notre dossier : 2024-03-0140

Le pont (schéma ici-bas) était composé de 5 sections ou plateformes, à savoir deux sections de 18 pieds, une section de 14 pieds, une section de 6 pieds et une petite section de liaison de 4 pieds. Les sections du pont étaient assemblées par l'entremise de boulons placés sous le plancher ainsi que par des plaques de liaison de pont au niveau des membrures inférieures, munies d'un assemblage par tige et goupilles. Nous avons numéroté les sections de 1 à 5 à partir de la gauche vers la droite, selon un observateur faisant face au bâtiment.



Des tubes pour chariot élévateur étaient placés sous le plancher des sections et servaient au transport des plateformes pour assemblage et/ou entreposage. Nous avons remarqué que les tubes pour chariot affichaient des déformations compatibles à l'insertion des fourchettes de chariot élévateur et ne seraient pas liés à la défaillance (photographie 7).

La structure des sections était composée de membrures verticales, horizontales et en angle, ces dernières retrouvées uniquement aux extrémités des plateformes non connectées à une autre section. Chaque section transversale des membrures mesurait environ 51 X 51 millimètres. Une perforation dans une des membrures de la section 5 nous a permis d'établir l'épaisseur du profilé en acier, à savoir environ 3,5 millimètres. La peinture de la structure des sections examinées était écaillée par endroit, voire absente. Des signes de corrosion étaient visibles sous les plaques des planchers ainsi que sur les membrures exposées aux intempéries (photographie 8).

La zone de défaillance se trouvait au niveau de la structure de la section 1. En effet, les quatre membrures inférieures de la plateforme étaient scindées en deux à proximité de la jonction entre la section 1 et 2 (photographie 9). Nous avons nommé les membrures de 1 à 4 à partir du sol. Par ailleurs, les membrures sous le plancher de la section 1 comportaient des signes de déformation permanente, compatibles à un bris par surcharge (photographie 10). Plus précisément, lesdites membrures ont cédé après la défaillance initiale et seraient une conséquence du bris initial.

Les membrures 1 à 3 affichaient des signes de corrosion à l'intérieur du profilé (photographies 11 à 13). Plus précisément, de l'eau ou de l'humidité aurait infiltré l'intérieur des membrures à travers les extrémités ouvertes. De plus, le processus de corrosion était avancé, diminuant l'épaisseur du profilé. À cet effet, l'épaisseur des profilés des membrures 1 à 3 variait de 0,85 à 2 millimètres, pris avec un vernier sur l'extrémité ouverte des membrures. Qui plus est, des perforations

■ ■ Nom du dossier : CNESST – Trois-Rivières
■ ■ Notre dossier : 2024-03-0140

associées à de la corrosion de l'acier étaient visibles sur les membrures précitées. Le faciès de rupture des membrures, quant à lui, affichait des zones corrodées, compatibles à une fissuration ouverte et exposée aux intempéries (photographie 14).

L'examen de la membrure 4 a démontré que celle-ci avait été soudée (photographie 15). En effet, une soudure au pourtour du profilé reliait deux sections de la membrure précitée. Le cordon de soudure et les alentours n'étaient pas peints, témoignant de la sorte que la soudure n'avait pas été réalisée par le fabricant. De plus, les autres sections, similaires à la plateforme 1, ne comportaient pas de soudure à cet endroit précis. Le bris de ce profilé a eu lieu au niveau de la soudure. Plus précisément, nous avons décelé des globules de métal fondu (photographie 16) et l'absence de métal de base sous le cordon de soudure. Ce fait indique un manque de fusion entre le cordon de soudure et le métal de base. Qui plus est, la contrepartie de la soudure comportait des signes de peinture brûlée, compatible à un manque de préparation de la surface du métal de base avant le soudage (photographie 17).

OPINION PRÉLIMINAIRE

En vertu des données obtenues à ce jour, nous sommes en mesure d'émettre les conclusions suivantes :

1. La défaillance a eu lieu au niveau des membrures inférieures de la structure de la section 1. Cette section aurait cédé en premier, créant un mouvement de traînage du pont, qui a fini par entraîner le bris des chaînes de sécurité;
2. Les membrures inférieures de la section 1 étaient affectées par l'amincissement d'épaisseur du profilé, généré par une corrosion généralisée de l'acier exposé aux intempéries;
3. La membrure 4 de la section 1 aurait été soudée sans préparation de surface au préalable, ce qui a mené à un manque de fusion entre le cordon de soudure et le métal de base. En d'autres mots, la soudure ne respectait pas les règles de l'art et par conséquent ne supportait pas mécaniquement la structure.

Nous sommes d'avis que le manque d'entretien adéquat et l'utilisation d'une section comportant des signes de corrosion visible, telle que les perforations décelées lors de notre examen, associé à la soudure inadéquate de la membrure 4, ont été la cause de la défaillance et par conséquent de l'accident impliquant le pont de l'échafaudage.

/ml

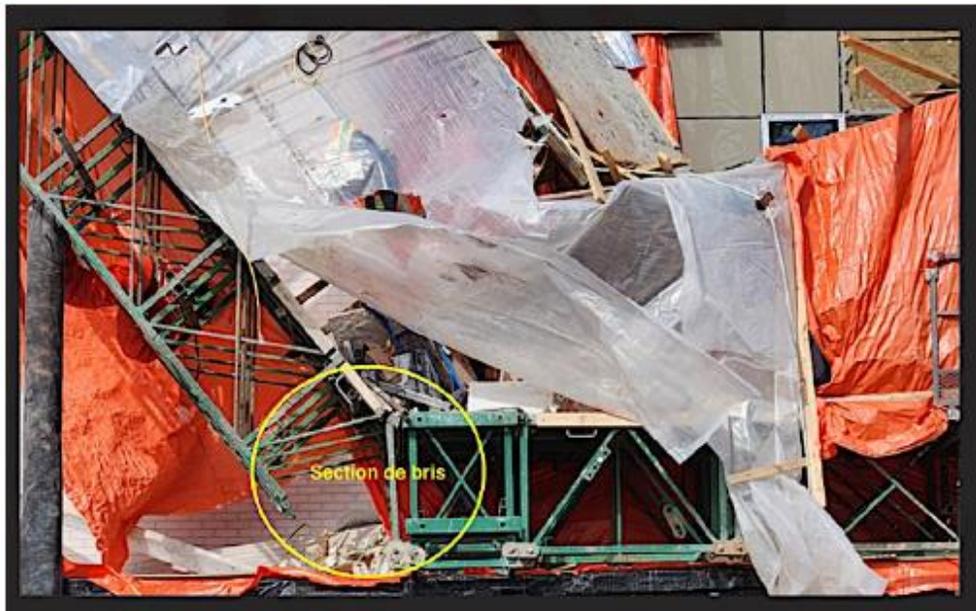
■ Nom du dossier : CNESST – Trois-Rivières
■ Notre dossier : 2024-03-0140

PHOTOGRAPHIES



Photographie 1
Échafaudage au complet

■ Nom du dossier : CNESST – Trois-Rivières
■ Notre dossier : 2024-03-0140



Photographie 2
Zone de bris

■ Nom du dossier : CNESST – Trois-Rivières
■ Notre dossier : 2024-03-0140



Photographie 3
Échafaudage lors de l'examen des lieux

■ Nom du dossier : CNESST – Trois-Rivières
■ Notre dossier : 2024-03-0140



Photographie 4
Inscription sur unité motorisée

■ Nom du dossier : CNESST – Trois-Rivières
■ Notre dossier : 2024-03-0140



Photographie 5
Emplacement présumé du pont

■ Nom du dossier : CNESST – Trois-Rivières
■ Notre dossier : 2024-03-0140



Photographie 6
Ancre brisé

■ Nom du dossier : CNESST – Trois-Rivières
■ Notre dossier : 2024-03-0140



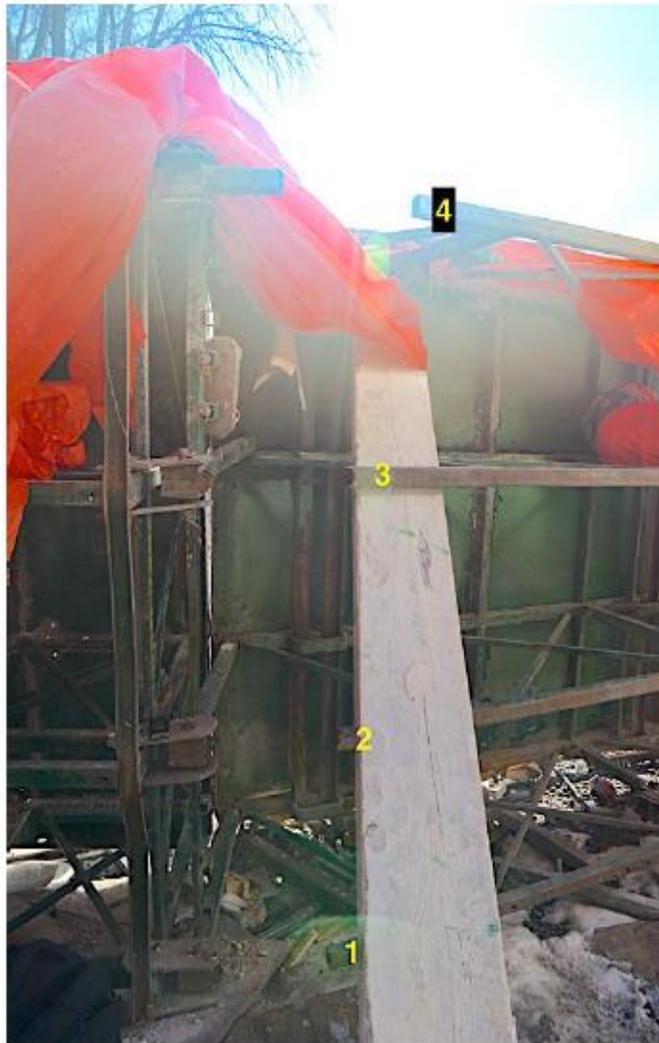
Photographie 7
Tube de chariot

■ Nom du dossier : CNESST – Trois-Rivières
■ Notre dossier : 2024-03-0140



Photographie 8
Corrosion sur structure

☐ ■ Nom du dossier : CNESST – Trois-Rivières
■ ☐ Notre dossier : 2024-03-0140



Photographie 9
Zone de bris

■ Nom du dossier : CNESST – Trois-Rivières
■ Notre dossier : 2024-03-0140



Photographie 10
Bris par surcharge

■ Nom du dossier : CNESST – Trois-Rivières
■ Notre dossier : 2024-03-0140



Photographie 11
Membre

■ ■ Nom du dossier : CNESST – Trois-Rivières
■ ■ Notre dossier : 2024-03-0140



Photographie 12
Membrane

■ Nom du dossier : CNESST – Trois-Rivières
■ Notre dossier : 2024-03-0140



Photographie 13
Membrure

■ Nom du dossier : CNESST – Trois-Rivières
■ Notre dossier : 2024-03-0140



Photographie 14
Faciès de rupture corrodé

■ Nom du dossier : CNESST – Trois-Rivières
■ Notre dossier : 2024-03-0140



Photographie 15
Membre

■ Nom du dossier : CNESST – Trois-Rivières
■ Notre dossier : 2024-03-0140

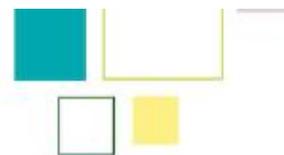


Photographie 16
Soudure

■ Nom du dossier : CNESST – Trois-Rivières
■ Notre dossier : 2024-03-0140



Photographie 17
Surface sans préparation pour soudure

**MONCTON**

520, Edinburgh Drive, unité 4
Moncton (Nouveau-Brunswick) E1E 4C6
506 801-8869

QUÉBEC

1345, boulevard Louis-XIV
Québec (Québec) G2L 1M4
418 622-4480

MONTREAL

2705, rue Michelin
Laval (Québec) H7L 5X6
450 686-0240

OTTAWA

15 Capella Ct., bureau 130
Ottawa (Ontario) K2E 7X1
613 234-1668

OSHAWA

1103, rue Wentworth Ouest, bureau 3
Oshawa (Ontario) L1J 8P7
905 404-0237

TORONTO

170 University Avenue, 3rd Floor, Box 1
Toronto (Ontario) M5H 3B3
647 483-0118

WATERLOO

180 Northfield Drive West, bureau 4
Waterloo (Ontario) N2L 0C7
226 476-0152

EDMONTON

9932 - 81^e Avenue NW, bureau 101
Edmonton (Alberta) T6E 1W6
780 420-1551

CALGARY

2435 - 42^e Avenue NE
Calgary (Alberta) T2E 8A3
403 230-2344

VANCOUVER

2221, rue Manitoba
Vancouver (Colombie-Britannique) V5Y 3A3
604 879-3585

ANNEXE C-Rapport d'expertise**RAPPORT D'EXPERTISE**

*Rapport d'expertise sur l'effondrement
d'un pont d'échafaudage dans un
chantier situé au 6, rue Fusey à
Trois-Rivières.*

Rapport présenté à

Julie LAVOIE et Steve LAPERLE
Inspecteurs
Direction de la prévention-inspection Capitale-Nationale et
Centre-Nord
CNESST

Préparé par :

Hussein Elahmed, ing.
Hussein ELAHMED, ing.
No. Membre OIQ : 5060399

Direction générale de la réglementation, du soutien et de
l'expertise
CNESST
22 juillet 2024

Table des matières

1. Mise en contexte.....	5
2. Description du mandat.....	5
3. Méthodologie.....	5
4. Informations recueillies.....	6
4.1 Description de l'échafaudage.....	6
4.2 Effondrement de l'échafaudage.....	8
4.3 Autres ruptures observées.....	13
5. Analyse.....	14
5.1 Analyse en fonction des documents du fabricant.....	15
5.1.1 Effet de la corrosion sur les membrures inférieures.....	16
5.1.2 Effet de la soudure réalisée sur la membrure inférieure.....	18
5.2 Analyse structurale de la section du pont ayant subi une rupture.....	20
5.2.1 Estimation du poids total de la partie B.....	22
5.2.2 Estimation de la résistance des membrures inférieures.....	24
6. Conclusion et recommandations.....	28
7. Références.....	29
8. Annexe.....	30

Liste des photos

Photo 1 - Effondrement du pont en appui simple sur les unités mobiles (source CNESST)	5
Photo 2 - Assemblage des membrures supérieures et inférieures (source CNESST)	8
Photo 3 - Ponts de liaison effondrés sur la marquise du bâtiment (source CNESST)	9
Photo 4 - Rupture des membrures inférieures de cette section du pont (source CNESST)	9
Photo 5 - Première membrure rompue avec des traces de corrosion avancée (source CNESST)	10
Photo 6 - Deuxième membrure rompue avec des traces de corrosion avancée (source CNESST)	10
Photo 7 - Troisième membrure rompue avec des traces de corrosion avancée de l'intérieur (source CNESST)	11
Photo 8 - Quatrième membrure rompue avec une soudure frontale (source CNESST)	12
Photo 9 - Exemple de rupture d'une membrure inférieure. La rupture est à proximité de l'assemblage (source CNESST)	12
Photo 10 - Barre d'ancrage rompue de l'unité mobile droite (source CNESST)	13
Photo 11 - Barre d'ancrage rompue de l'unité mobile gauche (source CNESST)	13
Photo 12 - Rupture de l'anneau de sécurité sur la plateforme de l'unité mobile droite (source CNESST)	14
Photo 13 - Rupture des anneaux de sécurité sur la plateforme de l'unité mobile gauche (source CNESST)	14
Photo 14 - Traces d'appui du pont modulaire sur l'unité mobile gauche (source CNESST)	21
Photo 15 - Une partie de la structure de protection avec le toit et les supports verticaux et horizontaux (source CNESST)	23
Photo 16 - Section transversale de la membrure 1 (Source CNESST)	25
Photo 17 - Section transversale de la membrure 2 (source CNESST)	25
Photo 18 - Section transversale de la membrure 3 (source CNESST)	26

Liste des figures

Figure 1 - Vue en élévation de l'installation. Les garde-corps et la structure de protection ne sont pas montrés dans cette illustration (source CNESST).....	6
Figure 2 - Vue en plan de l'installation. (Source CNESST).....	7
Figure 3 - Zones critiques dans une structure du pont modulaire (5,5 m). Image tirée du document HMT-0176-04-F.....	16
Figure 4 - Zones de réparation de la membrure inférieure d'un pont modulaire (5,5 m). Image tirée du document HMT-0174-04-F.....	18
Figure 5 - Limite de coupure pour une réparation dans la zone A. Image tirée du document HMT-0174-04-F.....	18
Figure 6 - Détails de l'installation de l'insert de réparation. Image tirée du document HMT-0174-04-F19	19
Figure 7 - Détails de fixation de l'insert de réparation. Image tirée du document HMT-0174-04-F.....	19
Figure 8 - Partie A et B du pont en appui simple avec les réactions aux appuis (source CNESST).....	20
Figure 9 - DCL de la partie A (source CNESST).....	20
Figure 10 - Détails techniques de pont modulaire 5,5 m. Image tirée du document HMT-0174-03-F ...	21
Figure 11 - Images tirées du Manuel de l'opérateur de la M2 2004 par Hydro Mobile Inc. et du Manuel de l'opérateur M2 V5.02 d'Hydro Mobile Inc.	30
Figure 12 - Image tirée du Manuel de l'opérateur de la M2 2004 par Hydro Mobile Inc.	31

Liste des tableaux

Tableau 1 - Mesure des épaisseurs minimales et maximales des 4 membrures rompues (source CEP Forensique) 13

Tableau 2 - Tableau des lectures des épaisseurs minimales et actions à entreprendre. Image tirée du document HMT-0176-04-F..... 16

Tableau 3 - Poids des ponts modulaires de la partie B, (source manuel de l'opérateur de la M2 2004 par Hydro Mobile Inc. et du manuel de l'opérateur M2 V5.02 d'Hydro Mobile Inc.) 22

Tableau 4 - Estimation du poids des composantes métalliques de la structure de protection (source CNESST). (*) Information tirée du HSC, Handbook of Steel Construction 2011 23

Tableau 5 - Estimation de la limite d'élasticité de l'acier des membrures (source CNESST). 27

1. Mise en contexte

Le 28 février 2024, un système d'échafaudage composé d'un pont et deux unités mobiles s'est effondré causant des blessures à cinq travailleurs. Au moment de l'accident, les cinq travailleurs se trouvaient sur le pont de liaison entre les unités mobiles. Cette structure a été installée sur un chantier situé au 6 rue Fusey à Trois-Rivières dans le but d'accomplir des travaux de parement extérieur en briques de la future maison des aînés.

Les unités mobiles sont des plateformes élévatrices le long de mâts de marque Hydro Mobile M2. Elles constituent aussi des appuis pour la structure du pont. Ce dernier est composé de cinq sections modulaires de la même marque.



Photo 1 - Effondrement du pont en appui simple sur les unités mobiles (source CNESST)

2. Description du mandat

Ce rapport vise à déterminer les facteurs qui ont conduit à l'effondrement du pont en appui simple sur les deux unités mobiles. Ce rapport prend en considération l'avis technique réalisé par l'entreprise CEP Forensique concernant la métallurgie du pont.

3. Méthodologie

Afin de déterminer les facteurs qui ont conduit à l'effondrement, nous allons utiliser deux approches :

- La première approche consiste à comparer la structure telle qu'installée avec les prescriptions du fabricant. À cet effet, des documents publiés par le fabricant Hydro Mobile ont été consultés. Ces documents contiennent des précautions devant être prises en considération.
- La deuxième approche consiste à réaliser une analyse structurale de la section du pont ayant subi une rupture. Pour ce faire, les forces présentes au

moment de l'accident seront comparées avec la résistance de cette section du pont.

4. Informations recueillies

Nous avons effectué deux visites sur les lieux de l'accident. La première a eu lieu le 29 février 2024, soit le lendemain de l'accident. Les lieux étaient demeurés inchangés à la suite de l'accident et nous ne pouvions pas nous approcher du système d'échafaudage.

La deuxième visite a eu lieu le 15 mars 2024. Lors de cette visite, nous étions accompagnés par madame Veronica Buss Almeida, ingénieure métallurgiste, de l'entreprise CEP Forensique. Son mandat était d'émettre une opinion technique liée à la métallurgie concernant le bris du pont en appui. Lors de la visite, le pont était déplacé et se trouvait au sol. Nous avons inspecté la structure du pont ainsi que les plateformes des unités mobiles.

4.1 Description de l'échafaudage

La configuration de l'échafaudage en cause est de type coins extérieurs, car chaque unité mobile est installée sur un coin du bâtiment. Les unités mobiles sont de marque Hydro Mobile M2 et elles sont reliées aux murs extérieurs et à la marquise du bâtiment par des barres d'ancrage. Ces unités, composées d'une plateforme, se déplacent le long de mâts. Ces unités constituent des appuis pour le pont, qui est composé de 5 sections modulaires de la même marque. Ces sections modulaires ont des longueurs variables.

Les croquis suivants illustrent cette installation :

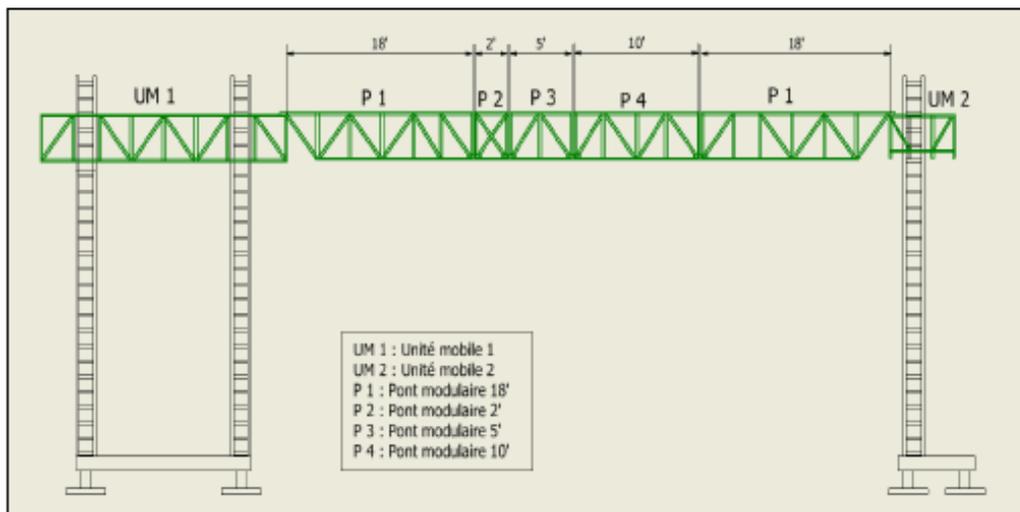


Figure 1 - Vue en élévation de l'installation. Les garde-corps et la structure de protection ne sont pas montrés dans cette illustration (source CNESST)

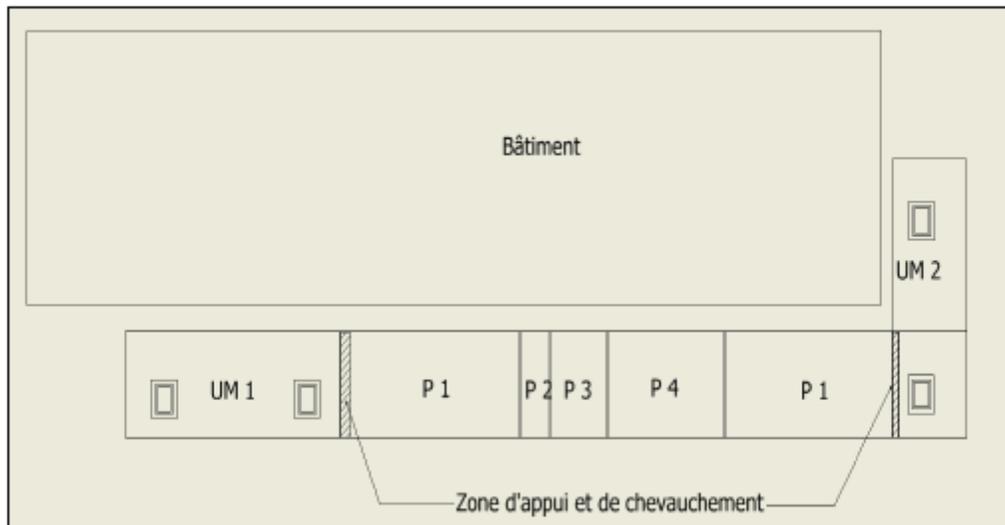


Figure 2 - Vue en plan de l'installation. (Source CNESST)

Le pont en appui simple est composé :

- De deux sections modulaires P1 qui ont une longueur 5,5 m (18 pi) et chacune est appuyée sur une unité mobile,
- Un pont modulaire P4 d'une longueur 3,1 m (10 pi),
- Un pont modulaire P3 d'une longueur 1,5 m (5 pi),
- Un pont à usage multiple P2 d'une longueur de 0,6 m (2 pi).

Les caractéristiques techniques des ponts modulaires ainsi que des unités mobiles sont présentées en annexe (figures 11 et 12).

L'assemblage des ponts modulaires est effectué au niveau des membrures supérieures et inférieures. Les membrures supérieures sont soudées à une cornière de raccordement qui est boulonnée à la cornière de la section adjacente. Quant aux membrures inférieures, elles sont assemblées par des plaques de liaison et des plaques de raccordement à l'aide des goupilles (photo 2).

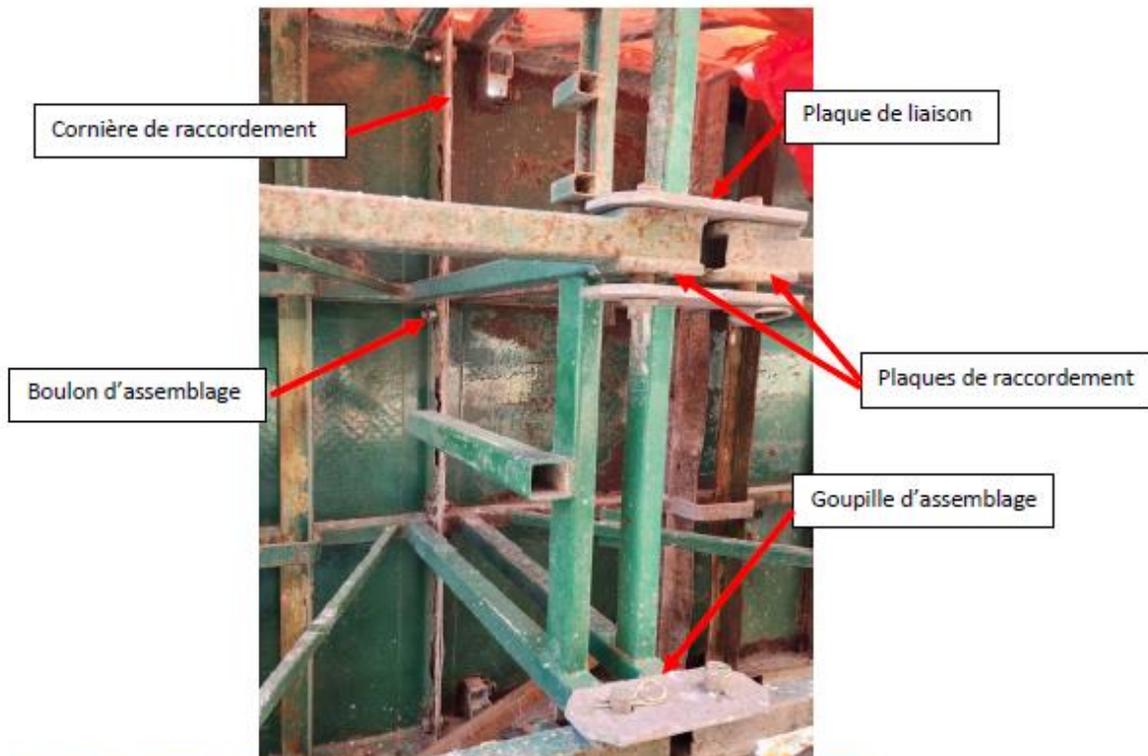


Photo 2 - Assemblage des membrures supérieures et inférieures (source CNESST)

4.2 Effondrement de l'échafaudage

Lors de l'accident, le pont en appui simple s'est effondré sur la marquise du bâtiment (photo 3). Une section du pont reposait complètement sur la marquise, tandis que l'autre était suspendue entre celle-ci et l'unité mobile gauche (UM1). Nous avons identifié une rupture au niveau des membrures inférieures de la section inclinée (photo 4).

Une structure de protection avec toile était installée sur le pont. De plus, les sections du pont étaient équipées de supports de madriers (longrines) qui supportaient une surface composée de trois madriers.

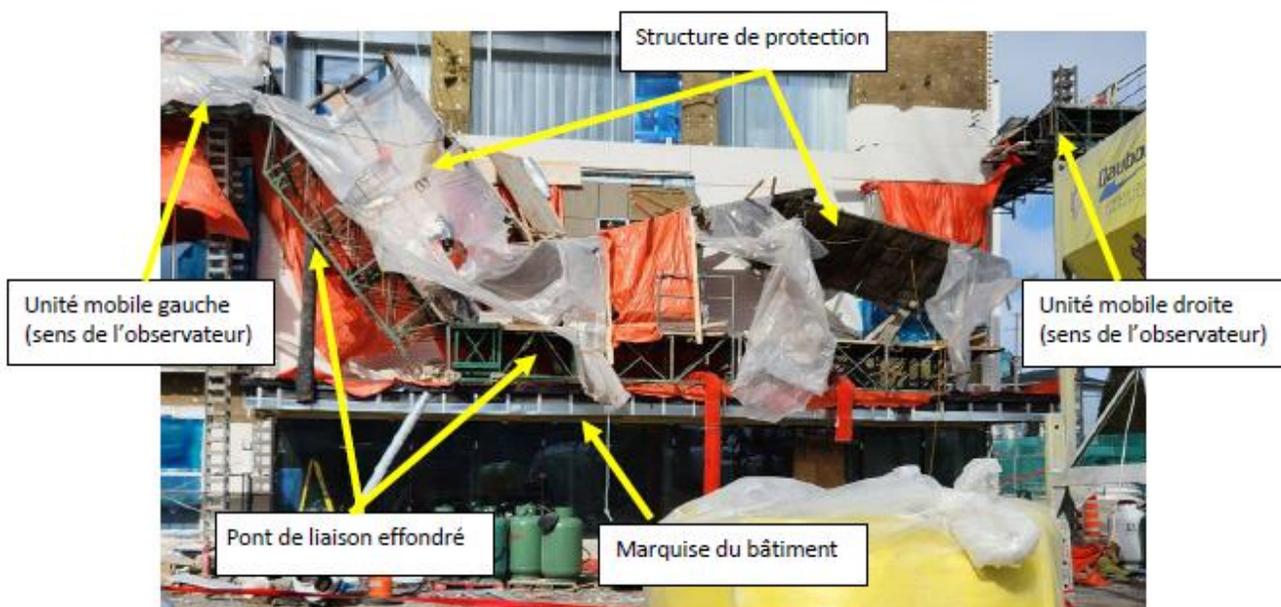


Photo 3 - Ponts de liaison effondrés sur la marquise du bâtiment (source CNESST)

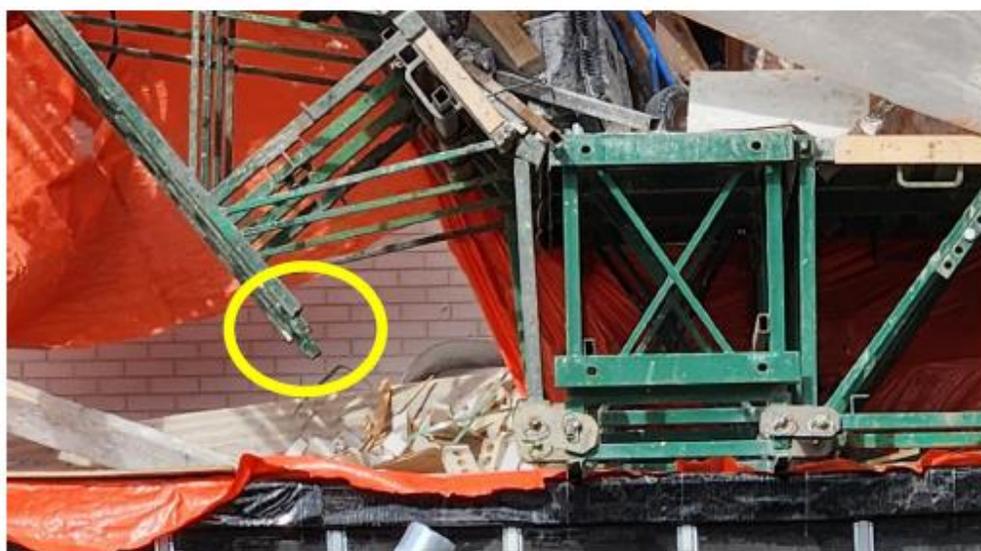


Photo 4 - Rupture des membrures inférieures de cette section du pont (source CNESST)

Quatre membrures inférieures, de la section P1 appuyée sur l'unité UM1, ont rompu. Aucune autre trace de déformation n'a été observée sur les membrures. Ces membrures sont affectées par une corrosion avancée (photos 5 à 7), notamment à proximité des assemblages. Seule la section P1 du pont a des membrures qui ont rompu.



Photo 5 - Première membrure rompue avec des traces de corrosion avancée (source CNESST)



Photo 6 - Deuxième membrure rompue avec des traces de corrosion avancée (source CNESST)



Photo 7 - Troisième membrure rompue avec des traces de corrosion avancée de l'intérieur (source CNESST)

Une des membrures inférieures rompues a été déjà réparée. Cette dernière a été soudée à une petite section qui a été assemblée à une membrure verticale, et par la suite à la section adjacente du pont (photo 8). Cette soudure a été réalisée en mois d'août 2023, à la suite d'un bri de cette membrure. À l'instar des autres membrures de cette section du pont, cette membrure présente une corrosion importante.

Pour 3 membrures, ces ruptures sont situées à proximité de l'assemblage (photo 9), tandis que la rupture de la membrure qui avait été soudée est située au niveau de la soudure (photo 8).



Photo 8 - Quatrième membrure rompue avec une soudure frontale (source CNESST)



Photo 9 - Exemple de rupture d'une membrure inférieure. La rupture est à proximité de l'assemblage (source CNESST)

Les sections transversales des membrures rompues ont une réduction importante d'épaisseur de parois des profilés métalliques. Le tableau suivant résume les épaisseurs maximales et minimales mesurées. Le sommaire d'investigation de CEP Forensique contient plus de détails.

Membrure	Épaisseur minimale (mm)	Épaisseur maximale (mm)
1	1,0	2,1
2	1,0	1,7
3	0,85	1,6
4	1,5	2,0

Tableau 1 - Mesure des épaisseurs minimales et maximales des 4 membrures rompues (source CEP Forensique)

Ces mesures ont été réalisées avec un vernier. Les couches corrodées n'ont pas été enlevées sur les surfaces des membrures. D'ailleurs certaines parois étaient complètement corrodées et même effritées sous l'effet de la corrosion. Un contrôle à l'ultrason, si réalisable dans ces conditions, aurait révélé des mesures nettement inférieures à celles effectuées sur place.

4.3 Autres ruptures observées

Sur les lieux de l'accident, nous avons observé d'autres ruptures, notamment au niveau des barres d'ancrage des unités mobiles (photos 10 et 11). Malgré la rupture de barres d'ancrage, les deux unités mobiles sont restées à leur position. Seules de légères inclinaisons des mâts ont été observées.



Photo 10 - Barre d'ancrage rompue de l'unité mobile droite (source CNESST)



Photo 11 - Barre d'ancrage rompue de l'unité mobile gauche (source CNESST)

En inspectant les plateformes des unités mobiles, nous avons observé que les anneaux de sécurité ont rompu (photos 12 et 13). Les anneaux sont des points d'ancrage pour les chaînes de retenu qui servent à empêcher les déplacements légers des plateformes sur les unités mobiles.



Photo 12 - Rupture de l'anneau de sécurité sur la plateforme de l'unité mobile droite (source CNESST)



Photo 13 - Rupture des anneaux de sécurité sur la plateforme de l'unité mobile gauche (source CNESST)

5. Analyse

Le mode de rupture des membrures inférieures correspond à une défaillance de la résistance de l'aire brute de la section des membrures. Ce mode de rupture est survenu dû à la réduction de l'épaisseur des parois des membrures, entraînant une réduction de l'aire de la section transversale des membrures et par conséquent une

réduction de la résistance en traction de ces membrures, amenant inévitablement à leur rupture.

Trois modes de ruptures pourraient survenir dans l'assemblage des membrures inférieures :

- o Une rupture des plaques de liaison ou de raccordement,
- o Une rupture des goupilles,
- o Une rupture de la membrure inférieure.

L'inspection des plaques de liaison et de raccordement ainsi que les goupilles permet d'écartier toute possibilité de rupture de ces composantes. Aucune trace de détérioration ou de bris n'a été observée sur ces composantes, à l'exception de quelques traces de corrosion sur les plaques de raccordement.

Comme mentionné précédemment, les membrures inférieures de la section du pont ayant subi une rupture, et qui était appuyée sur UM1, sont affectées par une corrosion avancée, notamment au niveau des endroits les plus proches des assemblages. Le sommaire d'investigation de CEP Forensique contient plus de détails.

De plus, selon le rapport de CEP Forensique, la soudure réalisée sur la membrure 4 ne supportait pas mécaniquement la structure en raison d'un manque de fusion entre le cordon de soudure et le métal de base. En outre, des lacunes au niveau de la préparation de la surface de base avant le soudage ont été observées

Dans un premier temps, nous allons comparer les résultats de nos observations avec les deux documents suivants du fabricant :

- HMT-0176-04-F, *Procédure d'inspection et d'entretien 2019 d'Hydro Mobile* qui a pour objet *Plan et procédure d'inspection structurale spécifiques aux ponts d'ancienne génération de série M*
- HMT-0174-03-F *Procédure d'inspection et d'entretien 2017 d'Hydro Mobile*, qui a pour objet *Procédure de réparation structurale pour les membrures inférieures des ponts d'ancienne génération de série M*

Par la suite, nous allons procéder à une analyse structurale.

5.1 Analyse en fonction des documents du fabricant

Le document *HMT-0176-04* contient des directives ainsi qu'une procédure à suivre pour effectuer les inspections structurales sur un pont modulaire similaire à celui ayant rompu. Des inspections à différentes fréquences doivent être effectuées au cours de l'utilisation du pont, dont celle après 10 ans de service. À cet effet, la structure du pont doit être soumise à un contrôle d'épaisseur à l'ultrason afin de déterminer si cette structure satisfait aux exigences minimales d'Hydro Mobile. Le tableau suivant résume les actions que l'employeur doit prendre en fonction des épaisseurs de parois mesurées à l'ultrason :

CRITÈRES POUR LES CONTRÔLES SUBSÉQUENTS	
Lecture de l'épaisseur minimale	Action
Plus de 0.1125 po (2,86 mm)	Nouveau contrôle 5 ans après la date du contrôle
Entre 0.106 po (2,69 mm) et 0.111 po (2,81 mm)	Nouveau contrôle 2 ans après la date du contrôle
Entre 0.100 po (2,54 mm) et 0.105 in (2,66 mm)	Nouveau contrôle 1 an après la date du contrôle
Moins de 0.100 po (2,54 mm)	L'équipement doit être mis hors service

Tableau 2 - Tableau des lectures des épaisseurs minimales et actions à entreprendre. Image tirée du document HMT-0176-04-F

Comme indiqué dans ce tableau, une épaisseur d'une paroi d'une membrure inférieure à 2,54 mm (0,100 po) requiert que l'équipement soit mis hors service. L'épaisseur des parois des membrures est comprise entre 0,85 mm et 2,1 mm (voir tableau 1). Selon ce tableau, le pont qui a rompu aurait dû être mis hors service.

Comme aucun contrôle des épaisseurs à l'ultrason n'a été effectué au cours des 10 dernières années et, en raison de la réduction importante des épaisseurs des membrures dues à la corrosion avancée, nous constatons que la procédure d'inspection n'est pas conforme aux directives du fabricant. Cet équipement n'aurait jamais dû être utilisé dans un tel état.

Par ailleurs, le document HMT-0176-04-F identifie les endroits situés près des points de raccordement comme des « zones critiques » (figure 3). Ce document indique que ces zones doivent être mises en évidence lors de l'inspection. Cette mise en garde est confirmée par les ruptures observées sur place.

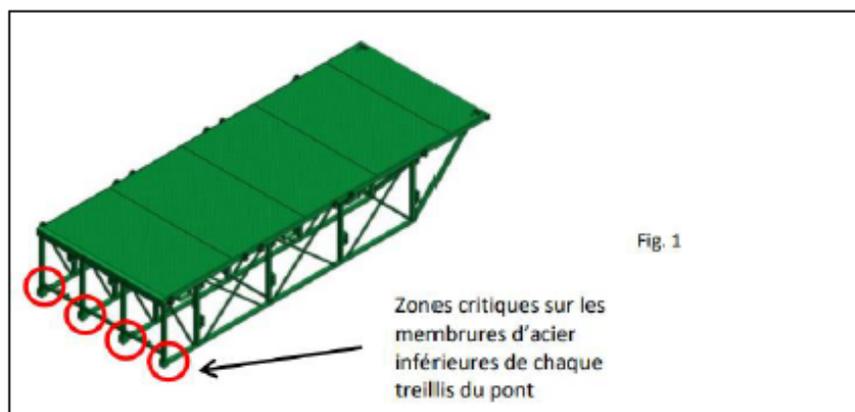


Figure 3 - Zones critiques dans une structure du pont modulaire (5,5 m). Image tirée du document HMT-0176-04-F.

5.1.1 Effet de la corrosion sur les membrures inférieures

En règle générale, les membrures inférieures sont davantage susceptibles de subir les effets de la corrosion que les autres membrures de la structure. Elles sont souvent exposées aux intempéries lors de l'utilisation du pont. De plus, elles sont en contact avec le sol durant leur entreposage. En conséquence, il est prévisible que leur dégradation due à la corrosion soit plus avancée par rapport aux autres membrures.

Selon le document *HMT-0174-03-F*, les membrures inférieures sont des tubes carrés creux, dont les dimensions sont de 50,8 mm x 50,8 mm x 3,175 mm d'épaisseur. Les zones critiques montrées sur la figure 3 sont exposées davantage aux effets de la corrosion à cause de leur proximité des extrémités des profilés. À ces endroits, la corrosion atmosphérique attaque les profilés creux de l'intérieur, ce qui a été confirmé par nos observations. La photo 7 illustre bien l'évolution de la réduction de l'épaisseur de la paroi du tube, successivement de l'extrémité vers l'intérieur sous l'effet de la corrosion.

En plus de la réduction de l'épaisseur des parois des profilés creux, les propriétés physiques de l'acier sont affectées par l'effet de la corrosion. À titre d'exemple, la limite de l'élasticité de l'acier F_y diminue si la corrosion de l'acier devient plus avancée. Selon les spécifications de l'acier des membrures inférieures, cet acier appartient à la nuance ASTM A500-C. La limite élastique de cette nuance est 345 MPa. Cependant, il n'est pas possible de considérer que l'acier des membrures rompues ait cette résistance au moment de l'accident, cette limite aurait été diminuée significativement à cause de la corrosion. En outre, l'acier ne peut pas développer un comportement ductile avant la rupture sous l'effet de cette corrosion excessive. Par conséquent, l'acier ne peut pas atteindre la contrainte de rupture F_u de la nuance ASTM A500-C qui est de 427 MPa.

En résumé, les zones critiques des membrures inférieures doivent faire l'objet d'une inspection rigoureuse à cause des facteurs suivants :

- Leur proximité de l'assemblage. À cet effet, les membrures sont susceptibles de subir une rupture à ces endroits à cause d'une défaillance de la section transversale de la membrure.
- Leur proximité de l'extrémité du profilé creux. Ce qui leur expose davantage à la propagation de la corrosion.

À la lumière de ce qui précède :

- La section du pont de l'échafaudage, constituée par un pont modulaire 5,5 m (18 pi) appuyé sur UM1, aurait dû être mise hors usage selon les spécifications du fabricant en raison d'une réduction de l'épaisseur des parois de toutes les membrures inférieures sous l'effet de la corrosion.
- L'inspection est déficiente. Aucun contrôle à l'ultrason de l'épaisseur des parois des membrures de l'équipement n'a été réalisé tel qu'exigé dans le manuel du fabricant. Si une telle inspection était en place, le pont aurait été mis hors d'usage en raison de l'épaisseur insuffisante des membrures. L'état de cet équipement au moment de son utilisation présentait un danger pour la santé et la sécurité des travailleurs.

5.1.2 Effet de la soudure réalisée sur la membrure inférieure

La soudure réalisée sur la membrure inférieure est qualifiée de soudure frontale, car le joint entre les deux sections soudées est de type bout à bout. Un contrôle à l'ultrason ou une inspection visuelle, le cas échéant, aurait dû être réalisé avant la réparation afin de déterminer une procédure de réparation conforme aux instructions du fabricant. De plus, un tel contrôle ou inspection aurait révélé une réduction de l'épaisseur de la paroi de la membrure en deçà de 2,54 mm en raison de la corrosion avancée de la membrure.

La réparation effectuée sur la membrure n'est pas conforme à la procédure de réparation indiquée par le fabricant dans le document HMT-0174-03-F . À cet effet, en cas de réparation partielle sur la zone à proximité de l'extrémité avec la plaque de jonction, identifiée par zone A dans le document du fabricant (figure 4), toute la zone A doit être retirée et la jonction doit être effectuée au milieu de la zone B (figure 5).

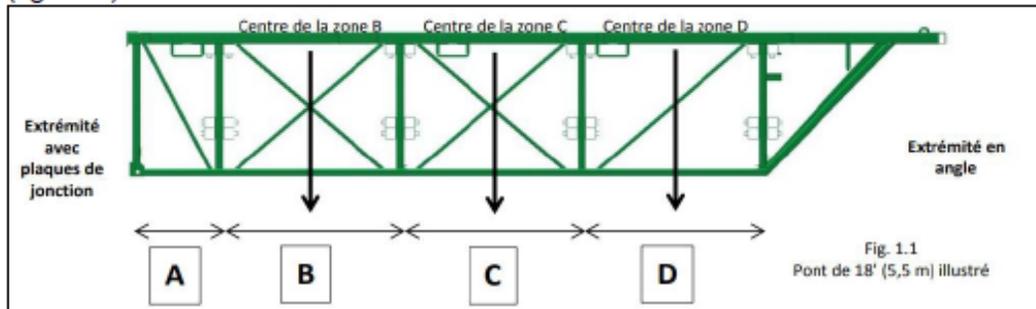


Figure 4 - Zones de réparation de la membrure inférieure d'un pont modulaire (5,5 m). Image tirée du document HMT-0174-04-F

Pour remplacer une section endommagée dans la zone A, il faut couper jusqu'à la moitié de la zone B comme montré sur la figure suivante :

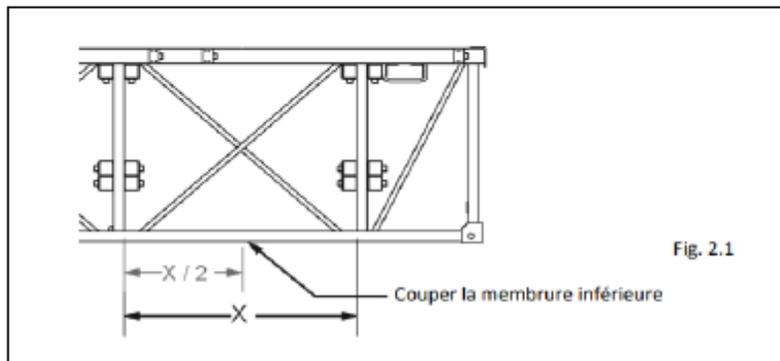


Figure 5 - Limite de coupure pour une réparation dans la zone A. Image tirée du document HMT-0174-04-F

À l'étape suivante, il faut insérer dans la membrure inférieure une pièce appelée un « Insert de réparation ». Il faut aussi souder cette pièce à l'aide des trous effectués dans la membrure comme montré sur la figure suivante.

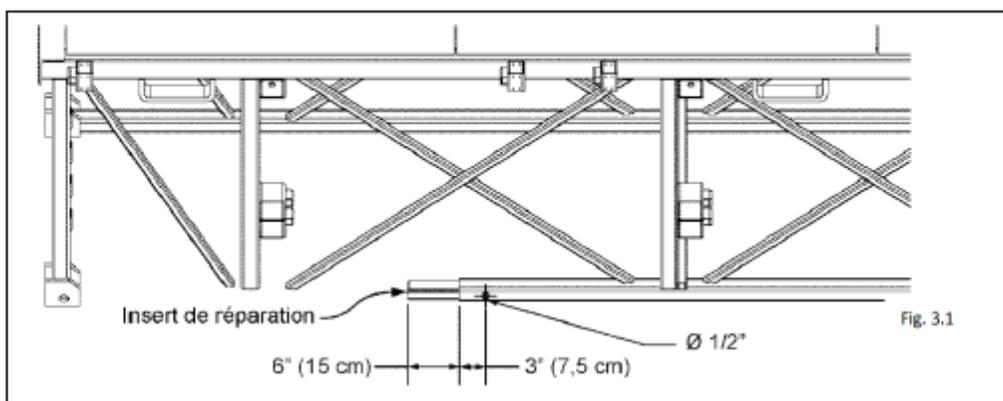


Figure 6 - Détails de l'installation de l'insert de réparation. Image tirée du document HMT-0174-04-F

Par la suite, il faut fabriquer une section de remplacement de la membrure inférieure. Cette dernière doit être glissée sur l'insert de réparation et la fixée au moyen des points de soudure tels qu'illustrés sur la figure suivante.

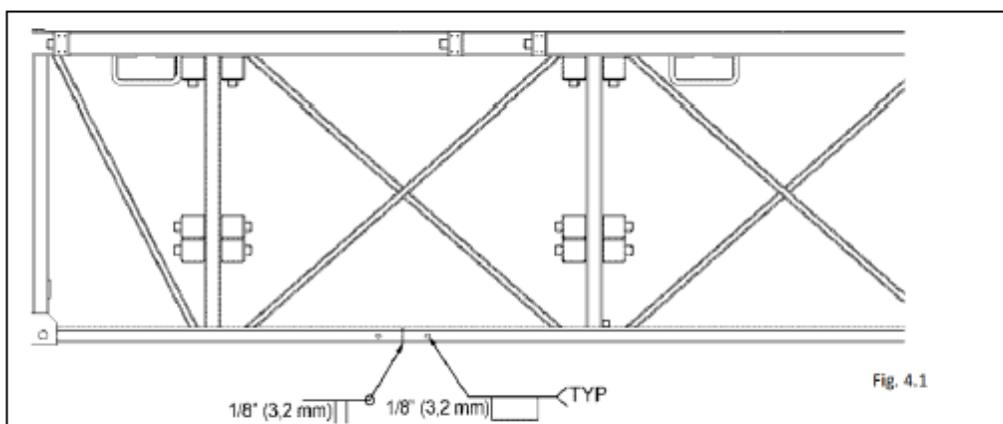


Figure 7 - Détails de fixation de l'insert de réparation. Image tirée du document HMT-0174-04-F

La dernière étape de la réparation consiste à souder la section de remplacement aux membrures verticales et inclinées.

Lorsque l'inspection de la membrure inférieure révèle d'autres réduction de l'épaisseur des parois dans les zones montrées dans la figure 4, un remplacement complet de la membrure pourrait être envisagé.

À la lumière de ce qui précède, la réparation effectuée en août 2023 n'est pas conforme à la procédure de réparation spécifiée par le fabricant. En plus, la soudure effectuée sur cette membrure n'était pas bien effectuée en raison d'un manque de fusion entre le cordon de soudure et le métal de base dû à des lacunes lors de la préparation de la surface de base avant le soudage. Une telle membrure soudée ne pouvait pas supporter mécaniquement la structure.

5.2 Analyse structurale de la section du pont ayant subi une rupture

Dans cette partie de l'analyse, nous allons calculer la force de traction dans les membrures afin de la comparer à la résistance des membrures.

Le pont est simplement appuyé sur les unités mobiles. Dans ce type d'installation, les membrures inférieures sont tendues, tandis que les membrures supérieures sont comprimées. Afin de calculer les forces de traction dans les membrures rompues du pont modulaire P1 d'une longueur de 5,5 m, nous allons effectuer un diagramme du corps libre (DCL) pour cette section du pont. Cette section est identifiée par partie A et le reste du pont est désignée par partie B (figure 8) :

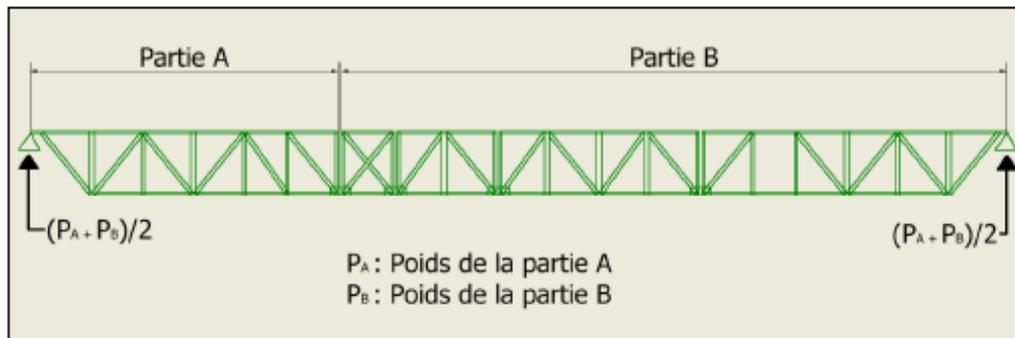


Figure 8 - Partie A et B du pont en appui simple avec les réactions aux appuis (source CNESST)

Le DCL de la partie A est montré sur la figure suivante :

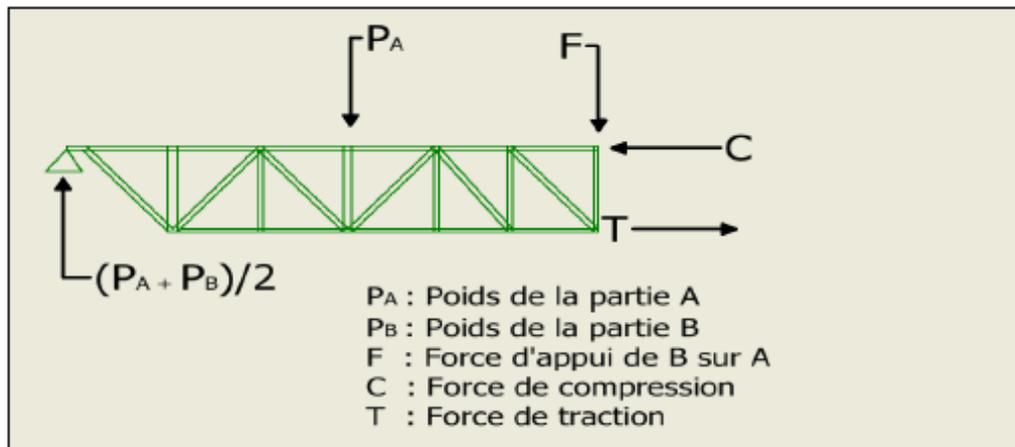


Figure 9 - DCL de la partie A (source CNESST)

L'équilibre des forces verticales donne : $P_A + F = \frac{P_A + P_B}{2}$

Donc : $F = \frac{P_A + P_B}{2} - P_A = \frac{P_B - P_A}{2}$

La deuxième équation de l'équilibre des forces consiste à faire la somme des moments autour du point de l'appui gauche du pont, nous allons l'appeler point O. On obtient l'équation suivante :

$$\sum M_o = P_A * \frac{L}{2} + F * L - T * h = 0$$

Où :

L = longueur de la partie – chevauchement sur l'unité mobile gauche

h = hauteur du pont modulaire,

Le chevauchement sur l'unité mobile gauche a été mesuré sur place, il est environ de 25 cm. Donc L = 5500 mm – 250 mm = 5250 mm = 5,25 m



Photo 14 - Traces d'appui du pont modulaire sur l'unité mobile gauche (source CNESST)

La hauteur du pont est égale à 91 cm = 0,91 m (figure 10)

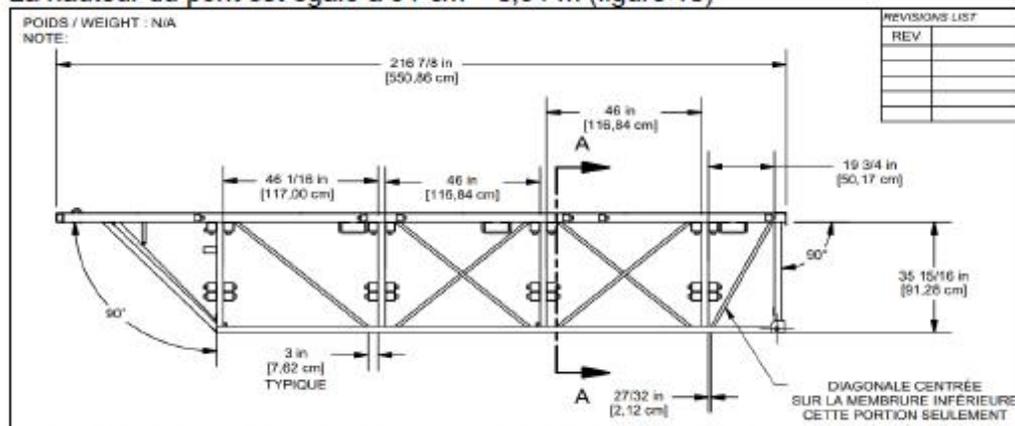


Figure 10 - Détails techniques de pont modulaire 5,5 m. Image tirée du document HMT-0174-03-F

À partir de l'équation de l'équilibre des moments, il est possible de déduire la force T :

$$T * h = P_A * \frac{L}{2} + F * L = P_A * \frac{L}{2} + \frac{P_B - P_A}{2} * L = P_B * \frac{L}{2}$$

Ce qui donne finalement :

$$T = \frac{P_B * L}{2 * h}$$

Afin de calculer cette force, il faut déterminer P_B . En fait cette force correspond au poids de la partie B ainsi que toutes les charges qui se trouvaient sur cette partie au moment de l'accident, à savoir :

- Le poids des 4 travailleurs avec leurs équipements. Le cinquième travailleur était sur la partie A.
- Deux palettes de briques
- Le poids de la structure de protection
- Une plateforme composée de 3 madriers d'échafaudage appuyée en porte-à-faux sur le pont de liaison. Seules les sections appuyées sur la partie B seront considérées.

5.2.1 Estimation du poids total de la partie B

Afin de calculer la force T, il faut estimer le poids total de la partie B. Ce poids inclut le poids de cette partie et toutes les charges énumérées précédemment.

Le tableau suivant résume les poids de chaque pont modulaire de la partie B. Ces informations ont été obtenues à partir des caractéristiques de ces ponts qui se trouvent en annexe :

Composante	Poids + poids du garde-corps
Pont (18 pi)	1185 + 20 = 1205 kg
Pont (5 pi)	361 + 19 = 380 kg
Pont (10 pi)	776 + 20 = 796 kg
Pont (2 pi)	265 + 14 = 279 kg
Total	2660 kg

Tableau 3 - Poids des ponts modulaires de la partie B, (source manuel de l'opérateur de la M2 2004 par Hydro Mobile Inc. et du manuel de l'opérateur M2 V5.02 d'Hydro Mobile Inc.)

Le poids des charges qui se trouvaient sur la partie B :

- Le poids des 4 travailleurs et leurs équipements estimé à 500 kg
- Le poids de deux palettes de briques estimé à 860 kg

Ce qui donne un total de 1360 kg.

Le poids de la structure de protection :

La structure de protection est composée par un cadre métallique, un toit en contreplaqué, et des supports verticaux et horizontaux (photo 15). Le cadre et les supports métalliques sont fabriqués de tubes creux HSS dont l'épaisseur est variable. Nous allons considérer l'épaisseur minimale mesurée sur place, qui est de 6,4 mm.

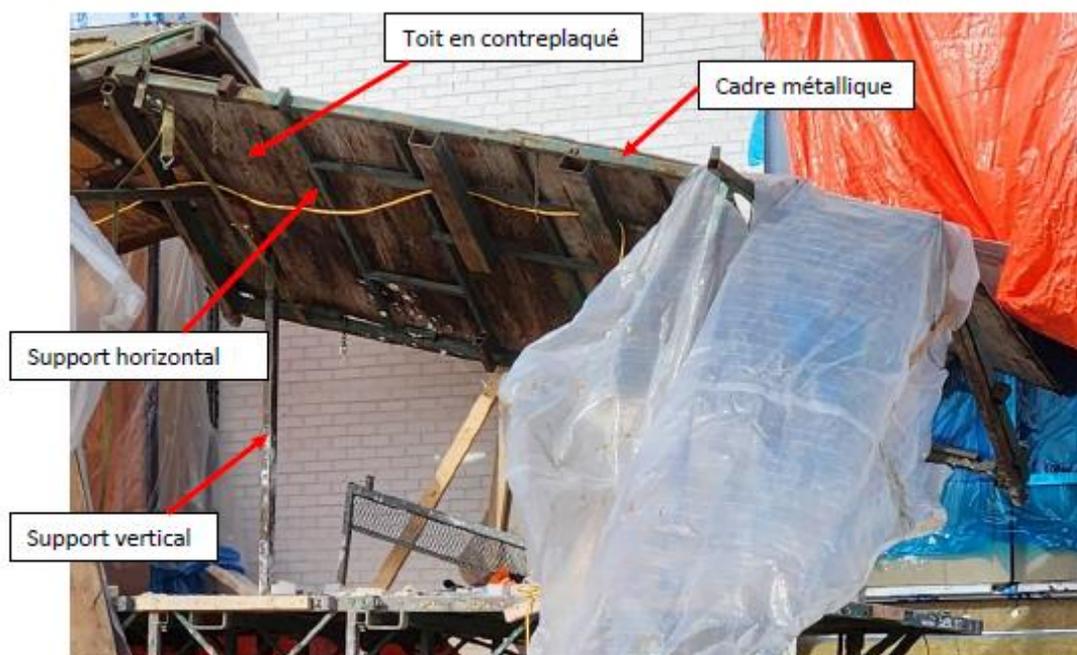


Photo 15 - Une partie de la structure de protection avec le toit et les supports verticaux et horizontaux (source CNESST)

Le tableau suivant résume les dimensions des différentes composantes métalliques de la structure de protection, ainsi qu'une estimation du poids de ces composantes :

Composante	Longueur (m)	Nombre	Périmètre (m)	Profilé	Poids/mètre (*)	Poids total de la composante (kg)
Supports horizontaux	2,2	12	–	HSS 51 x 51 x 6,4	8,05 kg/m	96
Supports verticaux	2,2	6	–	HSS 51 x 51 x 6,4	8,05 kg/m	48
Cadre métallique	–	1	24	HSS 51 x 51 x 6,4	8,05 kg/m	193
Total						337

Tableau 4 - Estimation du poids des composantes métalliques de la structure de protection (source CNESST). (*) Information tirée du HSC, Handbook of Steel Construction 2011

Il faut ajouter le poids du contreplaqué qui a une surface d'environ 24 m². Pour un contreplaqué de 12 mm d'épaisseur, son poids est de 0,064 kPa/m². Ce qui donne un poids de 156 kg pour ce contreplaqué. En total, le poids de la structure de protection est estimé à 493 kg.

Il faut ajouter le poids des madriers correspondant à une surface composée de 3 madriers qui s'étalent sur une distance de 10 m (environ 35 pi). Le poids de chaque madrier est estimé à 6 kg, ce qui donne un poids de 180 kg.

Finalement, le poids total de la partie B est : $180 + 493 + 1360 + 2660 = 4693$ kg
Ce qui permet de calculer la force de traction dans les membrures inférieures :

$$T = \frac{P_{B+L}}{2 \cdot h} = \frac{4693 + 9,8 \cdot 5,25}{2 \cdot 0,9} = 134 \text{ kN}$$

Comme le pont est composé de quatre fermes métalliques, cette force est distribuée sur les quatre membrures inférieures de chaque ferme.

Selon les prescriptions du Manuel de l'opérateur de la M2 2004 d'Hydro Mobile, la capacité du pont en appui simple ne doit pas dépasser 2268 kg (5000 lb) pour une installation en coin (page 40 du Manuel). Selon nos estimations, la charge sur la partie B (en excluant le poids des ponts) est d'environ 2033 kg. Si on ajoute la charge sur la partie A (en excluant le poids du pont modulaire 5,5 m), il est fort possible que la limite maximale pour une installation en coin soit dépassée.

5.2.2 Estimation de la résistance des membrures inférieures

Théoriquement, la résistance en traction d'une section d'une membrure de type HSS 51 x 51 x 3,2, est calculée par l'équation suivante :

$$R = \phi \cdot A_g \cdot F_y$$

$$\phi = \text{Coefficient de tenu en service} = 0,9$$

$$A_g = \text{Aire de la section transversale} = 528 \text{ mm}^2 \text{ (HSC 2011)}$$

$$F_y = \text{Limite élastique de l'acier} = 345 \text{ MPa, (nuance ASTM A500 - C)}$$

Cependant, la résistance des membrures rompues ne peut pas être calculée en utilisant cette équation à cause de l'amincissement de l'épaisseur des profilés HSS. Selon les résultats du sommaire d'investigation de l'entreprise CEP Forensique, les membrures inférieures de la section rompue étaient affectées par un amincissement de l'épaisseur des profilés, généré par une corrosion généralisée de l'acier exposé aux intempéries. Les zones ou les couches d'acier non atteintes par la corrosion ne sont pas uniformes ou continues pour constituer une aire d'une section complète (photos 16 et 17).



Photo 16 - Section transversale de la membrure 1 (Source CNESST)



Photo 17 - Section transversale de la membrure 2 (source CNESST)

La membrure 3 est la plus affectée par la corrosion. Les parois de cette membrure sont complètement corrodées (photo 18). D'ailleurs, l'amincissement de cette membrure est le plus prononcé avec une épaisseur qui varie entre 0,85 et 1,6 mm.



Photo 18 - Section transversale de la membrure 3 (source CNESST)

Quant à la membrure 4 (membrure soudée), la soudure ne supportait pas mécaniquement la structure. Toutefois, nous allons calculer la résistance de la membrure sans égard à l'effet de la soudure.

La corrosion avancée des membrures ne permet pas de considérer que l'acier garde ses propriétés physiques, notamment sa limite d'élasticité. Sous l'effet de la corrosion, les sections transversales des membrures inférieures subissent une perte de masse¹ définie comme suivant :

$$\frac{(m_0 - m)}{m_0} * t_0$$

m₀ est la masse du profilé non corrodé
m est la masse du profilé corrodé
t₀ est l'épaisseur du profilé non corrodé

La perte de la limite d'élasticité définie par l'équation² :

$$F_y = F_{y0} * (1 - 1,09\eta)$$

F_{y0} est la limite d'élasticité du profilé non corrodé
F_y est la limite d'élasticité du profilé corrodé
η est le taux de perte de masse

¹ Di Samo L, Majidian A, Karagiannakis G. The Effect of Atmospheric Corrosion on Steel Structures: A State-of-the-Art and Case-Study. *Buildings*. 2021; 11 (12):571.

² Wang, H. ; Xu, S. ; Li, A. ; Kang, K. Investigation expérimentale et numérique sur les performances sismiques des assemblages en acier soudé corrodé. *Eng. Struct.* 2018, 174, 10-25.

Aux fins d'estimation de la résistance des membrures, nous considérons que le taux de perte de masse est égal au taux de perte moyenne des épaisseurs. Cette approche est justifiée par le fait que la perte d'épaisseur est localisée aux endroits de la rupture. De plus, en l'absence de mesures de pertes de masses des sections corrodées, il serait plus conservateur d'estimer le taux de perte en fonction des mesures des épaisseurs. Le tableau suivant résume le calcul des taux de perte :

Membrane	Épaisseur minimale (mm)	Épaisseur maximale (mm)	Épaisseur moyenne (mm)	Taux de perte	Limite d'élasticité (MPa)
1	1,0	2,1	1,55	0,52	149
2	1,0	1,7	1,35	0,58	127
3	0,85	1,6	1,22	0,62	112
4	1,5	2	1,75	0,46	172

Tableau 5 - Estimation de la limite d'élasticité de l'acier des membrures (source CNESST).

Nous pouvons alors estimer la résistance de chaque membrane en utilisant l'équation suivante :

$$R = \phi * A_g * F_y * \frac{\text{Épaisseur moyenne}}{\text{Épaisseur nominale}}$$

Résultat :

$$R_1 = 34 \text{ kN}$$

$$R_2 = 25 \text{ kN}$$

$$R_3 = 20 \text{ kN}$$

$$R_4 = 44 \text{ kN}$$

La résistance en traction des quatre membrures est égale à la somme des résistances calculées qui donne 123 kN, ce qui est inférieur à la force de traction calculé de 134 kN. Même en négligeant la faiblesse au niveau de la soudure, la résistance des quatre membrures est inférieure à la force de traction. Il faut noter toutefois, que la rupture de la membrane soudée est survenue à l'endroit de la soudure à cause de la faiblesse de celle-ci.

À la lumière de ce qui précède, la rupture des membrures inférieures du pont modulaire appuyé sur UM1 est causée par une force de traction qui a dépassé la résistance de la section transversale des membrures.

La rupture du pont en appui simple a entraîné la rupture des anneaux de sécurité sur les deux unités mobiles, et la rupture des deux barres d'ancrage de ces unités (une barre rompue sur chaque unité). À la suite de l'effondrement, les parties A et B ont été suspendues aux unités mobiles. Par conséquent, les anneaux de sécurité se sont retrouvés dans une position similaire à une position de levage, ce qui a transmis des forces excessives à ces anneaux et aux barres d'ancrage, causant ainsi leur rupture. Aucun anneau de sécurité, ni barre d'ancrage n'est conçu pour ce type de sollicitation.

6. Conclusion et recommandations

Au terme de cette analyse, nous pouvons conclure que l'effondrement du pont de l'échafaudage a été initié dans la section appuyée sur l'unité mobile gauche (UM1), section constituée par un pont modulaire d'une longueur de 5,5 m (18 pi). Trois membrures inférieures de cette section ont subi une rupture à cause d'une réduction excessive de l'épaisseur des profilés d'acier sous l'effet de la corrosion, ce qui a diminué considérablement la résistance en traction de ces membrures. En plus de l'amincissement de l'épaisseur sous l'effet de la corrosion, la quatrième membrure a rompu à cause d'une soudure qui ne supportait pas mécaniquement la structure. Même en négligeant la faiblesse au niveau de la soudure, la résistance totale des quatre membrures était inférieure à la force de traction.

La soudure réalisée sur la quatrième membrure n'était pas conforme à la procédure de réparation spécifiée par le fabricant. De plus, l'inspection de cette soudure a démontré des lacunes par rapport à sa réalisation, ce qui a affaibli davantage la résistance totale en traction des membrures, qui était déjà réduite à cause de la corrosion.

Les zones où les membrures ont rompu sont identifiées par le fabricant comme des zones « critiques ». Le fabricant exige une procédure d'inspection rigoureuse à ces endroits et un contrôle à l'ultrason afin de s'assurer que l'épaisseur des parois est supérieure à la valeur de 2,54 mm. Au moment de l'accident, les épaisseurs des quatre membrures dans les zones critiques ont été inférieures à cette limite, ce qui indique que la procédure d'inspection est déficiente.

Cet accident met en évidence l'importance de mettre en place une procédure d'inspection conforme aux exigences du fabricant, notamment des contrôles périodiques de l'épaisseur des membrures à l'ultrason. En cas de réparation effectuée sur une membrure, celle-ci doit être réalisée selon les méthodes prescrites par le fabricant et si nécessaire, il faut remplacer la membrure.

7. Références

- Institut canadien de la construction en acier. *Handbook of Steel Construction, Tenth Edition. 2011.*
- Caron Patrice. Introduction aux charpentes d'acier, CCDMD, 2022, 402 p.
- Sommaire d'investigation, CEP FORENSIQUE, Veronica Buss Almeida, Hugo Julien.
- Manuel du propriétaire 2015, HYDRO MOBILE
- Manuel de l'opérateur de la M2 2004, HYDRO MOBILE
- Procédure d'inspection et d'entretien 2019, HMT-0176-04-F, HYDRO MOBILE
- Procédure d'inspection et d'entretien 2017, HMT-0174-03-F, HYDRO MOBILE
- Di Sarno L, Majidian A, Karagiannakis G. The Effect of Atmospheric Corrosion on Steel Structures: A State-of-the-Art and Case-Study. *Buildings*. 2021; 11(12):571.
- Wang, H.; Xu, S.; Li, A.; Kang, K. Experimental and numerical investigation on seismic performance of corroded welded steel connections. *Eng. Struct.* 2018, 174, 10–25.

8. Annexe

Ponts





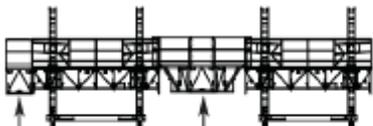
18' (5,5 m)	Spécifications du pont
Dimensions	216 3/4" x 91" x 39 1/2" (5,5m x 2,3m x 1,0m)
Poids	2 610 lb (1 185 kg)
Garde-corps	3x 60" (1,5m) - 45 lb (20 kg) chaque
Garde-corps mobile	Rangement sur l'unité motorisée (M2)
Support de madriers supérieure	4x 2" x 2" x 1/8" x 60" lg (51mm x 51mm x 3mm x 1,5m)
Support de madrier inférieure	4x 2 1/2" x 2 1/2" x 3/16" x 84" lg (64mm x 64mm x 5mm x 2,1m)
Adaptateur de support de madriers de porte-à-faux	Rangement sur l'unité motorisée (M2)
Jeux de boulons & écrous	6x 1" x 2 1/2" lg GR5 unc (20,4mm x 64mm)
Jeux de plaques de raccord	8x
Pochettes pour monorail & système anti-intempéries	4

16' (2,1 m)	Spécifications du pont
Dimensions	123 1/4" x 91" x 39 1/2" (3,1m x 2,3m x 1,0m)
Poids	1 710 lb (776kg)
Garde-corps	2x 60" (1,5m) - 45 lb (20 kg) chaque
Garde-corps mobile	Rangement sur l'unité motorisée (M2)
Support de madriers supérieure	4x 2" x 2" x 1/8" x 60" lg (51mm x 51mm x 3mm x 1,5m)
Support de madrier inférieure	4x 2 1/2" x 2 1/2" x 3/16" x 84" lg (64mm x 64mm x 5mm x 2,1m)
Adaptateur de support de madriers de porte-à-faux	Non requis
Jeux de boulons & écrous	6x 1" x 2 1/2" lg GR5 unc (20,4mm x 64mm)
Jeux de plaques de raccord	8x
Pochettes pour monorail & système anti-intempéries	2



2' (0,6 m)	Spécifications du pont
Dimensions	26 1/2" x 91" x 39 1/2" (0,7m x 2,3m x 1,0m)
Poids	580 lb (265 kg)
Garde-corps	1x 24" (0,6m) - 30 lb (14 kg)
Pochette de garde-corps	2x
Garde-corps mobile	non requis
Support de madriers supérieure	4x 2" x 2" x 1/8" x 60" lg (51mm x 51mm x 3mm x 1,5m)
Adaptateur de support de madriers de porte-à-faux	Non requis
Support de madrier inférieure	2x 2 1/2" x 2 1/2" x 3/16" x 84" lg (64mm x 64mm x 5mm x 2,1m)
Jeux de boulons & écrous	6x 1" x 2 1/2" lg GR5 unc (20,4mm x 64mm)
Jeux de plaques de raccord	8x
Pochettes pour monorail & système anti-intempéries	Aucune

Pont modulaire de 5' (1,5 m)

Dimensions	60 1/16" x 67 13/16" x 39 3/16" (153 cm x 223 cm x 100 cm)
Poids	795 lb (361 kg)
Garde-corps	1x 60" (1,5 m) - 42 lb (19 kg)
Longrine	1x 2 1/2" x 1 1/2" x 3/16" x 72" de long (6,4 cm x 3,8 cm x 0,5 cm x 183 cm)
Assemblage de boulons	4x 1" x 2" de long (GR5)
Assemblage de plaque de liaison et de goupilles	4x assemblages de plaques de liaison et de goupilles standard

Figure 11 - Images tirées du Manuel de l'opérateur de la M2 2004 par Hydro Mobile Inc. et du Manuel de l'opérateur M2 V5.02 d'Hydro Mobile Inc.

Caractéristiques techniques de l'unité motorisée	
Dimensions de la plateforme de travail	7' larg x 24' long x 4' haut (2,1m larg x 7,3m long x 1,2m haut)
Dimensions – transport	100" x 288" x 48" + 6" collet du mât (2,57m x 4,27m x 1,37 m + 152mm)
Charge maximale	20 000 lb (9,070 kg)
Hauteur maximale	Jusqu'à 250' (76 m) sans autorisation du fabricant
Hauteur autostable	35' (10,7m) avec longrines de la base entièrement sorties
Poids de la plateforme + sa base	4 900 lb (2 223 kg) + 2 300 lb (1 043 kg) = 7 200 lb (3 266 kg) (toute équipée)
Garde-corps portés	70 lb x 2 = 140 lb (63,5 kg)
Portes	80 lb x 2 = 160 lb (72,6 kg)
Garde-corps d'extrémité	70 lb x 2 = 140 lb (63,5 kg)
Garde-corps amovible	80 lb x 2 = 160 lb (72,6 kg)
Vitesse de déplacement	3' (0,9m) par minute
Type de moteur	Moteur à essence, démarreur électrique Honda 9,0 CV
Section de mât	16" x 16" x 60" (40,6cm x 40,6cm x 1,5m) 220 lb (100 kg) par section

Figure 12 - Image tirée du Manuel de l'opérateur de la M2 2004 par Hydro Mobile Inc.

ANNEXE D-Références bibliographiques

QUÉBEC. *Code de sécurité pour les travaux de construction, RLRQ, chapitre S-2.1, r.4, à jour au 1^{er} mai 2024*, [En ligne], 2024. [<http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/showdoc/cr/S-2.1,%20r.%204>] (Consulté le 5 août 2024).

QUÉBEC. *Loi sur la santé et la sécurité du travail, RLRQ, chapitre S-2.1, à jour 1^{er} mai 2024*, [En ligne], 2024 [<http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cs/S-2.1>] (Consulté le 5 août 2024).

QUEBEC. MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES, DE LA FAUNE ET DES PARCS. *Données climatiques : observations quotidiennes*, [En ligne], 2024. [<http://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/donnees/OQcarte.asp>] (Consulté le 5 août 2024).

ASSOCIATION CANADIENNE DE NORMALISATION. *Conception, calculs, exigences relatives à la sécurité et méthodes d'essai pour des plates-formes de travail se déplaçant le long de mâts (MCWP)*, Toronto, CSA, 2018, 74 p. (CSA B354.9-17).

HYDRO MOBILE. *Manuel du propriétaire, série M2*, L'Assomption, Hydro Mobile, 2015, 125 p.

HYDRO MOBILE. *Plan et procédure d'inspection structurale spécifiques aux ponts d'ancienne génération de Série M*, L'Assomption, Hydro Mobile, 2019, 23 p.

HYDRO MOBILE. *Procédure de réparation structurale pour les membrures inférieures des ponts d'ancienne génération de série M*, L'Assomption, Hydro Mobile, 2017, 19 p.