

RAPPORT D'ENQUÊTE**EN004466**

Accident ayant causé la mort d'un travailleur et causé des blessures à trois travailleurs de l'entreprise 9115-2389 Québec inc. (A. M. Installations), survenu le 29 mai 2025 à Sorel-Tracy

Version dépersonnalisée

Service de la prévention-inspection – Montérégie-Est

Inspectrice :

Claudia Bernard

Inspecteur :

Mathieu Lamy

Date du rapport : 4 décembre 2025

Rapport distribué à :

- Monsieur Pierre-Luc Morin, président, 9115-2389 Québec inc. (A. M. Installations)
- Monsieur Keven Hébert, représentant du maître d'œuvre, Les Habitations Richard Hébert inc.
- Maître Nathalie Lefebvre, coroner
- Docteure Julie Loslier, directrice régionale de santé publique, Centre intégré de santé et de services sociaux de la Montérégie-Centre
- Monsieur Alexandre Ricard, président, Fédération des travailleurs et travailleuses du Québec – Construction (FTQ-Construction)
- Monsieur Carl Dufour, président, Centrale des syndicats démocratiques-Construction (CSD-Construction)
- Monsieur Pierre Brassard, président, Confédération des syndicats nationaux-Construction (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 RÉSUMÉ DU RAPPORT</u>	<u>1</u>
<u>2 ORGANISATION DU TRAVAIL</u>	<u>3</u>
2.1 STRUCTURE GÉNÉRALE DU CHANTIER	3
2.2 STRUCTURE GÉNÉRALE DE L'EMPLOYEUR	3
2.3 ORGANISATION DE LA SANTÉ ET DE LA SÉCURITÉ DU TRAVAIL	4
2.3.1 MÉCANISMES DE PARTICIPATION	4
2.3.2 GESTION DE LA SANTÉ ET DE LA SÉCURITÉ	5
<u>3 DESCRIPTION DU TRAVAIL</u>	<u>6</u>
3.1 DESCRIPTION DU LIEU DE TRAVAIL	6
3.2 DESCRIPTION DU TRAVAIL À EFFECTUER	7
<u>4 ACCIDENT : FAITS ET ANALYSE</u>	<u>9</u>
4.1 CHRONOLOGIE DE L'ACCIDENT	9
4.2 CONSTATATIONS ET INFORMATIONS RECUEILLIES	11
4.2.1 COMPOSITION DE L'ÉQUIPE DE TRAVAIL ET EXPÉRIENCE DES TRAVAILLEURS	11
4.2.2 LES COMPOSANTS DU DÔME	12
4.2.3 CONTREVENTEMENT TEMPORAIRE	14
4.2.4 PLANS ET GUIDE DU FABRICANT/MANUEL D'INSTALLATION	17
4.2.5 MÉTHODE DE MONTAGE DE LA STRUCTURE EMPLOYÉE	20
4.2.6 PROTECTION CONTRE LES CHUTES	24
4.2.7 INFORMATIONS EXTRAITES DU RAPPORT D'EXPERTISE	25
4.2.8 LOIS ET RÈGLEMENTATION	26
4.3 ÉNONCÉS ET ANALYSE DES CAUSES	28
4.3.1 ALORS QUE DES TRAVAILLEURS SE TROUVENT SOUS LA STRUCTURE DU DÔME EN COURS DE MONTAGE, CELLE-CI S'EFFONDRE, ATTEINT MORTELLEMENT UN TRAVAILLEUR ET EN BLESSE TROIS AUTRES.	28
4.3.2 LA MÉTHODE DE TRAVAIL UTILISÉE POUR LE MONTAGE DE LA STRUCTURE DU DÔME EST DANGEREUSE PARCE QU'ELLE N'ASSURE PAS SA STABILITÉ PENDANT SON INSTALLATION.	28
<u>5 CONCLUSION</u>	<u>30</u>
5.1 CAUSES DE L'ACCIDENT	30
5.2 RECOMMANDATIONS	30
ANNEXE A – LISTE DES ACCIDENTÉS	31
ANNEXE B – RAPPORT D'EXPERTISE	33
ANNEXE C - RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	67

SECTION 1

1 RÉSUMÉ DU RAPPORT

Description de l'accident

Le 29 mai 2025, vers 14 h 30, sur un chantier de construction situé au 1696, route Marie-Victorin à Sorel-Tracy, huit travailleurs assemblent les arches en acier galvanisé qui composent la structure d'un dôme d'entreposage sur sa fondation en béton. Alors que l'installation des 19 arches, de 30 m de large, est complétée, celles-ci basculent et s'effondrent au sol. L'effondrement entraîne la chute de deux travailleurs qui étaient à bord d'une plateforme élévatrice, leur occasionnant des blessures. Il entraîne également des blessures à un autre travailleur ainsi que le décès du chef d'équipe, tous deux situés à l'intérieur du bâtiment.

Conséquences

Le chef d'équipe décède et trois travailleurs sont blessés.

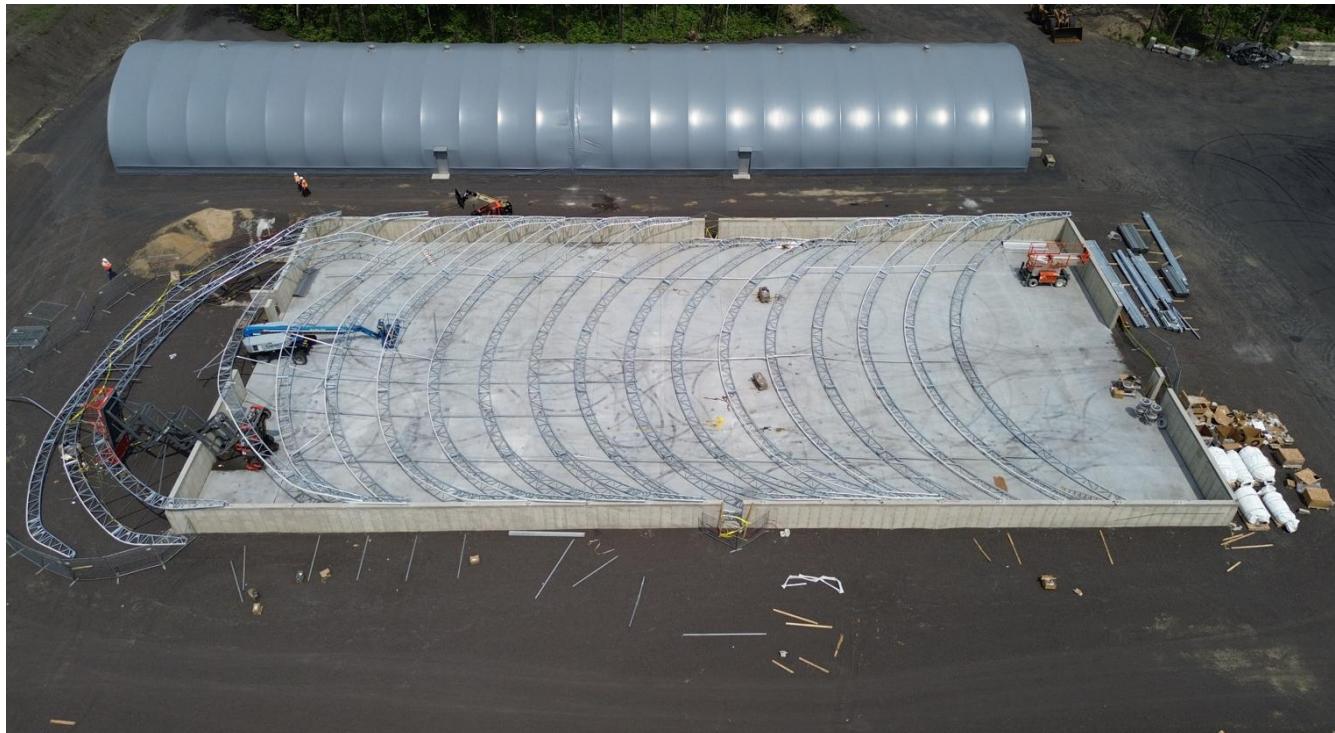


Figure 1: *Photo du lieu de l'accident*
Source : CNESST

Libellé des causes

- Alors que des travailleurs se trouvent sous la structure du dôme en cours de montage, celle-ci s'effondre, atteint mortellement un travailleur et en blesse trois autres.
- La méthode de travail utilisée pour le montage de la structure du dôme est dangereuse parce qu'elle n'assure pas sa stabilité pendant son installation.

Mesures correctives

Le 29 mai 2025, la CNESST interdit l'accès au chantier du dôme 2, incluant le démantèlement de la structure métallique du dôme en construction. La CNESST exige du maître d'œuvre qu'il mette en place une méthode de travail sécuritaire pour le retrait des composants de structure et des équipements de levage renversés ou endommagés (RAP9147306).

Le 6 juin 2025, la CNESST ordonne la suspension des travaux d'installation de la structure métallique (arches) des dômes 2 à 6 (RAP1514925). Elle exige l'élaboration d'une procédure de travail de montage de la structure métallique. Le maître d'œuvre doit aussi s'assurer de valider si l'état des ancrages permet l'installation des arches sans modifier ou altérer ces ancrages.

Le 14 juillet 2025, la CNESST autorise la reprise des travaux d'installation de la structure métallique (arches) pour les dômes 3 à 6 considérant la réception d'une procédure de montage sécuritaire ainsi qu'un rapport incluant les résultats favorables à la suite des essais d'arrachement sur les ancrages installés dans la fondation de béton du dôme 3 (RAP1519302).

Le 2 septembre 2025, la CNESST autorise la réouverture du chantier du dôme 2, notamment pour le démantèlement, considérant la réception d'une procédure sécuritaire élaborée par un ingénieur (RAP1524776).

Le 24 octobre 2025, la CNESST autorise la reprise des travaux d'installation de la structure métallique (arches) pour le dôme 2 considérant qu'un plan d'ingénierie pour la réparation des ancrages endommagés est soumis (RAP1532076).

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

Le projet consiste en la construction de six dômes d'entreposage industriels sur un même terrain. Un premier dôme plus étroit a été construit à l'été 2024 par les mêmes sous-traitants. Pour l'été 2025, le projet consiste à en construire cinq identiques, soit d'une dimension de 30 m (98 pi) x 60,5 m (198 pi). La construction ultérieure de dômes supplémentaires est envisagée.

Cette année, les travaux de construction ont débuté le 9 avril 2025 et le coût des travaux est estimé à 3 830 000 \$.

Les Habitations Richard Hébert inc. sont le propriétaire du site ainsi que le maître d'œuvre du chantier. Les Habitations Richard Hébert inc. ont la responsabilité de l'exécution des travaux de construction et de l'octroi des contrats de travail aux employeurs sous-traitants du chantier de construction.

Les Habitations Richard Hébert inc. sont d'abord une entreprise de gestion immobilière et effectuent aussi des travaux de rénovation et d'entretien de bâtiments résidentiels et commerciaux.

En tant que maître d'œuvre, ils retiennent les services de divers sous-traitants pour le chantier, dont ceux de l'entreprise 9115-2389 Québec inc. (A. M. Installations), ci-après nommé l'employeur, afin d'effectuer l'érection de la structure métallique des différents dômes.

Le maître d'œuvre n'a pas nommé de surintendant ou de contremaître pour le chantier. Au besoin, les travailleurs se réfèrent à M. A. [REDACTED], un travailleur du maître d'œuvre.

2.2 Structure générale de l'employeur

L'entreprise A. M. Installations est située au 49, rue Salvas à Yamaska. Elle se spécialise dans la construction de silos, d'élévateurs à grains et de convoyeurs. Depuis 2024, elle fait aussi la construction de dômes.

L'établissement est classé dans le secteur d'activités *Bâtiments et travaux publics*. L'entreprise compte environ 35 travailleurs non syndiqués, travaillant sur un quart de jour, du lundi au vendredi. De ce nombre, une vingtaine d'entre eux sont des travailleurs étrangers temporaires (TET) contractuels.

Le 29 mai 2025, huit travailleurs, dont un chef d'équipe, sont assignés au chantier pour installer la structure métallique.

Selon les informations recueillies, les travailleurs se rapportent au chef d'équipe. Ce dernier se rapporte au directeur des opérations ou au président directement.



Fig. 2 : *Organigramme de l'employeur*
Source : 9115-2389 Québec inc. (A. M. Installations)

2.3 Organisation de la santé et de la sécurité du travail

2.3.1 Mécanismes de participation

2.3.1.1 Le maître d'œuvre

Il n'y a pas de mécanisme de participation tel qu'un comité de santé et de sécurité. Pour un chantier de cette envergure, la *Loi sur la santé et la sécurité du travail* (LSST) n'oblige pas la constitution d'un comité de chantier, ni la présence d'un coordonnateur en santé et en sécurité (CoSS). La présence d'un représentant en santé et en sécurité (RSS) à temps partiel est exigée, mais aucun représentant n'est nommé.

Les questions de santé et de sécurité sont discutées directement entre les travailleurs et, au besoin, avec le représentant de l'employeur de chaque sous-traitant.

2.3.1.2 L'employeur

A. M. Installations n'a pas de comité de santé et de sécurité ni de représentant en santé et en sécurité. [REDACTED] Il n'y a pas de mécanisme formel de participation.

2.3.2 Gestion de la santé et de la sécurité

2.3.2.1 Le maître d'œuvre

Le maître d'œuvre ne possède pas de programme de prévention. Aucun processus formel n'est mis en place afin de gérer la santé et la sécurité sur le chantier de construction.

2.3.2.2 L'employeur

Deux programmes de prévention distincts sont présents chez l'employeur, [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED]. Les programmes de prévention concernent les métiers de *Monteur/Assembleur* et *Grutier*. Le programme de prévention est présenté aux travailleurs à leur embauche, puis annuellement ou lors d'une mise à jour. Une copie de ces programmes de prévention est fournie à chacun des chefs d'équipe en début de saison et est laissée dans le cartable/guide de prévention. Des copies sont aussi disponibles en espagnol.

Le programme de prévention de *Monteur/Assembleur* comprend, entre autres, une section *Charpente métallique* indiquant différentes mesures préventives.

B [REDACTED] effectue des pauses sécurité à l'occasion.

SECTION 3

3 DESCRIPTION DU TRAVAIL

3.1 Description du lieu de travail

Le chantier est situé au 1696, route Marie-Victorin à Sorel-Tracy. Le projet consiste en la construction de six dômes d'entreposage. Le dôme n° 1 a été construit à l'été 2024. Le dôme impliqué lors de l'accident est le dôme n° 2.



Fig. 3 : *Vue générale du chantier*
Source : CNESST

Le dôme n° 2, à l'exception de sa fondation en béton, est fabriqué en usine et livré en pièces pour être assemblé sur le chantier. Il s'agit d'un dôme fabriqué par Les Industries Harnois inc. sous la marque Megadome. Le modèle est le XP-100 HDD et les dimensions du dôme sont de 30 m (98 pi) x 60,5 m (198 pi).

Le jour de l'accident, des travailleurs de l'entreprise A. M. Installations procèdent à l'érection de la structure métallique du dôme n° 2. Des travaux sont aussi en cours aux dômes n°s 3, 4 et 6, où des travailleurs d'autres sous-traitants sont présents.

La structure métallique, composée d'arches, s'appuie sur les murs d'une fondation en béton.

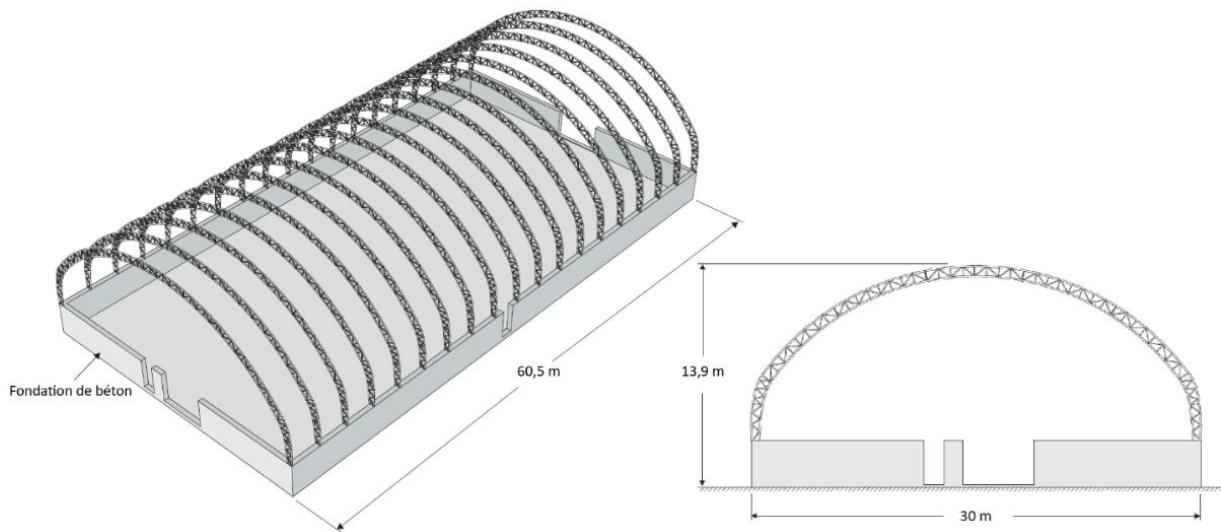


Fig. 4 : Dimensions du dôme

Source : CNESST

Selon les données de Météo Canada, le 29 mai 2025, la température extérieure varie de 11 à 19 degrés et la force du vent atteint un maximum de 15,7 km/h.

3.2 Description du travail à effectuer

Les principales étapes de la construction d'un tel bâtiment sont les suivantes :

- l'excavation;
- la pose de l'armature et l'installation des ancrages;
- la construction des fondations et de la dalle de béton;
- le montage de la structure métallique;
- l'installation de la toile de recouvrement.

Le 29 mai 2025, le montage de la structure métallique est en cours sur le chantier du dôme n° 2. Les travaux prévus pour la journée consistent à installer les 12 dernières arches sur la structure du bâtiment, les 7 premières ayant été installées la veille. Huit travailleurs participent aux travaux.

Les travaux de montage de la structure, selon ce qui était exécuté sur le chantier, s'effectuent à l'aide d'une grue mobile et suivent cette séquence générale :

- la livraison sur le chantier des composantes des arches;
- l'installation des ancrages chimiques;
- l'assemblage des arches au sol;
- l'installation des arches en débutant par l'arrière du bâtiment;
- la stabilisation des arches avec des haubans de corde et des courrois d'arrimage;
- l'installation de trois rangées de longerons au fur et à mesure de la mise en place des arches.

Après le départ de la grue mobile, une fois les 19 arches en place, les travailleurs installent les longerons et les tubes de contreventement restants.

Pour les travaux exécutés en hauteur, trois appareils de levage de personnes sont mis à la disposition des travailleurs :

- Nacelle à flèche articulée Genie S65
- Plateforme élévatrice Snorkel S3970RT
- Plateforme élévatrice Skyjack SJ8841RT

Deux équipements de levage de matériaux sont utilisés lors des travaux :

- Grue 45 tonnes
- Chariot élévateur à mât télescopique JLG modèle G5-18A

SECTION 4

4 ACCIDENT : FAITS ET ANALYSE

4.1 Chronologie de l'accident

Entre le 23 et le 27 mai 2025, des travaux préparatifs débutent au chantier. Ces travaux comprennent l'assemblage des arches au sol ainsi que le perçage et l'installation des ancrages chimiques par l'équipe d'A. M. Installations.

Le 28 mai 2025, vers 6 h 30, le chef d'équipe se rend au chantier en compagnie de 7 travailleurs. Le grutier arrive quelques temps après.

Des travailleurs poursuivent l'assemblage des arches au sol alors que d'autres débutent l'installation des arches sur la fondation. La première arche est mise en place vers 10 h 45, après que des difficultés avec l'alignement des ancrages aient retardé son positionnement. Lors de cette journée, les travailleurs terminent l'assemblage des 19 arches au sol et en installent 7 sur la fondation. Les travaux se terminent vers 17 h.

Le 29 mai 2025, vers 7 h, le chef d'équipe accède au chantier en compagnie des 7 mêmes travailleurs. Le grutier arrive peu de temps après et la grue mobile est déjà sur place pour poursuivre l'installation des arches. Dès ce moment, le grutier constate que la structure est inclinée. Certains membres de l'équipe d'A. M. Installations tentent de redresser la structure avec des haubans. L'installation des arches se poursuit par les autres travailleurs.

La dernière arche est installée un peu avant 13 h. Les travailleurs vont dîner alors que le grutier ferme ses équipements et quitte le chantier.

Lorsque les travaux reprennent, les travailleurs constatent que la structure penche vers l'avant du bâtiment. Deux haubans sont ajoutés pour redresser la structure. En tendant ces haubans, un de leur point d'ancrage cède sur le bloc de béton qui leur sert d'amarre (figure 5C).

Le chef d'équipe et deux travailleurs remettent en place un ancrage pour y réattacher les haubans. À la demande du chef d'équipe, au même moment, deux équipes composées de deux et de trois travailleurs s'élèvent dans leur plateforme élévatrice respective (figure 5A et 5B) pour procéder à l'installation des tubes de contreventement. Les équipes se positionnent à chaque extrémité de la structure.

Vers 14 h 30, alors qu'ils s'élèvent avec la plateforme élévatrice vers leur position de travail, les travailleurs qui prennent place dans la plateforme élévatrice B constatent que la structure s'incline et chute vers l'arrière du bâtiment. Les travailleurs se penchent vers le fond de la plateforme et voient la structure s'effondrer vers l'arrière.

La plateforme élévatrice A dans laquelle se trouvent deux travailleurs est emportée dans la chute, poussée par un hauban et par les arches. Ses occupants font une chute d'environ 8 m. Ils sont tous les deux blessés et transportés par ambulance après avoir reçu les premiers soins.

Le chef d'équipe se situe près du centre du bâtiment avec deux autres travailleurs (figure 5D). Un d'entre eux est heurté à la jambe par la structure et transporté à l'hôpital quelques heures plus tard. Le chef d'équipe est, quant à lui, heurté à la tête, son décès est constaté sur place.

En raison de leur positionnement à l'extérieur de la zone de chute de la structure, les trois occupants de la plateforme élévatrice B ne sont pas touchés par l'effondrement.

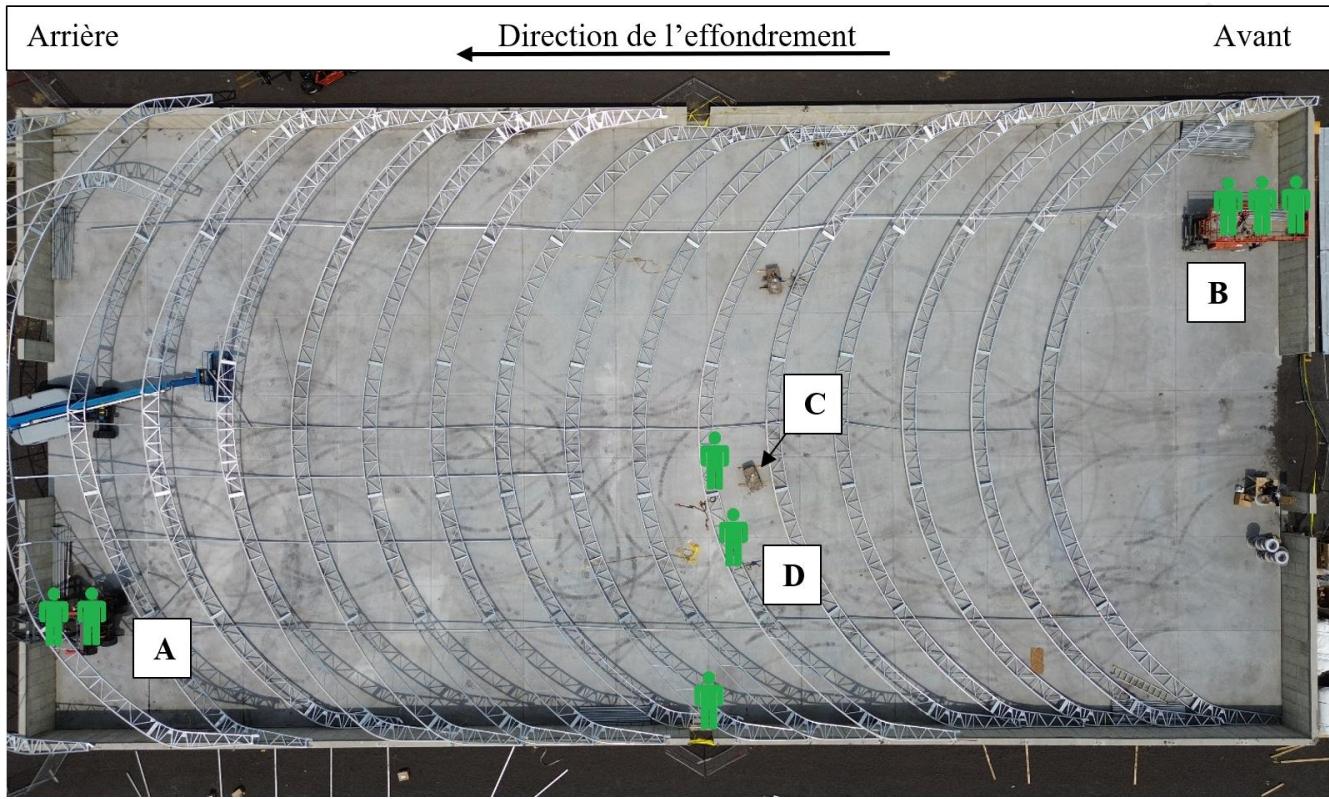


Fig. 5 : Position des travailleurs et des équipements

Source : CNESST

4.2 Constatations et informations recueillies

4.2.1 Composition de l'équipe de travail et expérience des travailleurs

Le jour de l'accident, l'équipe de travail est composée de huit travailleurs : un chef d'équipe, trois travailleurs [REDACTED] et quatre travailleurs [REDACTED]. Deux grutiers se partagent la tâche pour l'opération de la grue mobile.

Les travailleurs de A. M. Installations affectés au montage de dôme sont des journaliers et n'ont pas de carte de compétence délivrées par la Commission de la construction du Québec (CCQ). Ils travaillent de jour, sur un horaire de 6 h 30 à 17 h 30 environ.

Les travailleurs reçoivent une formation sur la tâche par accompagnement. Des formations diverses en santé et en sécurité leur sont données à leur arrivée en poste, dont le cours de 30 heures *Santé et sécurité générale sur les chantiers de construction*.

M. B, chef d'équipe

M. B [REDACTED] était à l'emploi de l'entreprise A. M. Installations depuis [REDACTED]. [REDACTED]. Il avait une formation [REDACTED] et cumulait plusieurs années d'expérience en montage de structure métallique [REDACTED]. Il n'avait pas de cartes de compétences de monteur d'acier au Québec.

L'employeur a débuté l'installation des dômes avec l'arrivée de M. B [REDACTED] dans l'équipe. Dès ce moment, l'employeur prévoyait qu'il en fasse sa spécialité. Lors des premiers montages de dôme, un représentant du fabricant Les Industries Harnois inc. était présent sur les lieux pour lui transmettre les façons de faire.

Au moment de l'accident, le chef d'équipe avait environ 12 dômes de construits à son actif. Cependant, c'était la première fois qu'il avait la charge de la construction d'un dôme de cette largeur, c'est-à-dire pour lequel les arches sont de plus grandes dimensions.

En tant que chef d'équipe, il avait la responsabilité de coordonner et de superviser les travailleurs de son équipe. Il était la personne qui donnait les directives sur le chantier.

Équipe de travail

L'équipe de travail était séparée en deux sous-groupes.

Le premier sous-groupe comprenait trois travailleurs, soit Mme C [REDACTED], M. D [REDACTED] et M. E [REDACTED]. Tous les trois ont entre un et cinq mois d'ancienneté chez l'employeur. Seule Mme C [REDACTED] avait déjà participé à la construction d'un dôme sous la supervision du même chef d'équipe.

Le deuxième sous-groupe était formé de quatre travailleurs [REDACTED], soit MM F [REDACTED], G [REDACTED], H [REDACTED] et I [REDACTED]. M. F [REDACTED] agit comme responsable de l'équipe. [REDACTED] et facilite la transmission des directives aux membres de l'équipe qui parlent seulement [REDACTED].

[REDACTED] Leurs tâches habituelles consistent en la construction de bases de silos. C'était la première fois qu'ils travaillaient sur la construction d'un dôme. Les travailleurs ont entre [REDACTED] d'ancienneté chez l'employeur.

4.2.2 Les composants du dôme

4.2.2.1 Éléments de la structure

Les principaux éléments qui constituent la structure sont les suivants :

- **Arches** : Le dôme est constitué de 19 arches tubulaires identiques en acier galvanisé. Une arche mesure 30 m de large, 11,75 m de haut et a une masse de 1 003 kg. Elles prennent place sur une fondation en béton d'un peu plus de 2 m, portant la hauteur totale de la structure à environ 14 m. Au moment de l'accident, les 19 arches sont en place.
- **Longerons** : Les longerons sont des tubes ovales en acier galvanisé d'un diamètre de 90 mm et d'une longueur d'environ 3,5 m. Ils relient les arches entre elles pour former 21 liens longitudinaux continus. Un boulon relie chaque longeron à chacune des arches. Au moment de l'accident, environ 30 % des longerons sont installés.
- **Tubes de contreventement de 25 mm** : Des tubes de contreventement d'un diamètre de 25 mm et d'une longueur d'environ 0,8 m forment un lien triangulaire à la jonction des longerons et des arches. Au moment de l'accident, les tubes de contreventement de 25 mm ne sont pas installés.
- **Câbles d'acier** : Des sections de câbles d'acier d'un diamètre de 9,5 mm forment 6 liens qui relient les coins opposés de la structure, en partant de la base des trois premières arches jusqu'à la base des trois dernières, en se croisant au sommet de l'arche centrale. Au moment de l'accident, les câbles d'acier ne sont pas installés.
- **Supports étriers** : Les supports étriers relient la base de chacune des arches à l'intérieur de la fondation de béton, à l'exception des deux arches d'extrémité.

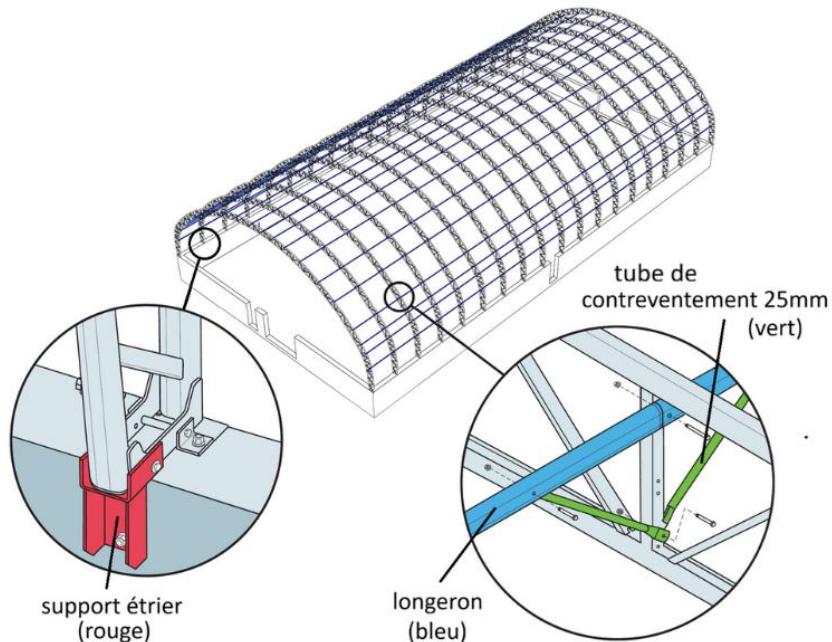


Fig. 6 : Éléments de la structure
Source : CNESST

4.2.2.2 Ancrages

Trois types d'ancrages sont utilisés dans la construction du dôme :

- **Tiges filetées de 25 mm:** Ces tiges de 25 mm de diamètre et de 380 mm de longueur ont été coulées dans la fondation à une profondeur d'environ 305 mm. Huit de ces tiges filetées sont utilisées pour attacher les deux arches d'extrémité à la fondation de béton, ce qui fait deux par coin. Douze autres sont utilisées pour attacher les câbles d'acier de 9,5 mm.
- **Ancrages en « L » de 16 mm :** Ces ancrages d'un diamètre de 16 mm et d'une longueur de 200 mm sont coulés dans la fondation, à la base de chacune des arches, pour y attacher les tendeurs à courroie qui sécuriseront la toile du dôme.
- **Tiges filetées de 16 mm:** Ces tiges d'un diamètre de 16 mm forment des « ancrages chimiques », c'est-à-dire qu'elles sont insérées dans un trou percé dans le béton avec lequel elles sont liées par un adhésif. Quatre tiges de 255 mm de longueur sont utilisées pour ancrer la base de chacune des arches, soit deux de chaque côté de l'arche. Les deux arches d'extrémités font exception puisqu'elles utilisent les tiges filetées de 25 mm coulées dans la fondation.

Une autre tige de 16 mm de diamètre, d'une longueur de 127 mm, est utilisée pour ancrer la base de l'arche par l'intérieur de la fondation à l'aide d'un support étrier (figure 6).

Lors de l'installation des arches d'extrémité, une problématique est survenue avec la disposition des tiges filetées de 25 mm. Certaines tiges n'étaient pas alignées correctement avec les trous dans lesquels elles devaient s'insérer. Des membres de l'équipe d'installation ont consulté un travailleur du maître d'œuvre qui avait procédé à l'installation de ces ancrages. Ils ont ensuite redressé les tiges en frappant sur celles-ci à l'aide d'une masse. Des fissures dans le béton ont été observées par les travailleurs à la suite de ces manœuvres.

Lorsque la structure s'est effondrée, les tiges filetées de 25 mm qui ancrent les arches d'extrémités ont été arrachées de la fondation (figure 7A). Sur les coins de la fondation, le béton s'est brisé (figure 7B).

Les ancrages des autres arches se sont également rompus, que ce soit parce que leurs tiges d'ancrage ont été arrachées au béton ou par le bris d'autres éléments de quincaillerie (figure 7C).



Fig. 7 : Photographies des ancrages après l'effondrement
Source : CNESST

4.2.3 Contreventement temporaire

Le contreventement temporaire est constitué de haubans, composés des éléments suivants :

- Sangles à cliquet de marque Erickson conçues pour une charge de travail maximale de 1 497 kg (3 300 lb). Leur résistance à la rupture est de 4 536 kg (10 000 lb).
- Sangle à cliquet bleue de marque et de résistance inconnues.
- Corde de polypropylène jaune de 9,5 mm de diamètre. Le numéro de produit du fabricant est A1PJ-038 et sa résistance est de 961,62 kg (2 120 lb).
- Palans à chaîne à levier 1 tonne (t) de marque Power Fist, d'une capacité de 907 kg (2 000 lb).
- Palans à chaîne à levier 2 t de marque Power Fist, d'une capacité de 1 996 kg (4 400 lb).
- Des blocs de béton d'environ 60 cm par 60 cm par 120 cm, d'une masse d'environ 1 000 kg (2 200 lb) chacun.

Il est à noter que le fabricant prévoit, pour le contreventement temporaire, l'utilisation de corde Polytwist 9,5 mm blanche, qu'il fournit et identifie par le numéro de pièce 1TN003. Le numéro de produit du fabricant est C1TT038/06. Il s'agit d'une corde de nylon dont la résistance est de 1 859,73 kg (4 100 lb).

Cependant, les haubans ont été réalisés avec la corde de polypropylène 9,5 mm jaune fournie également par le fabricant, mais prévue pour le hissage de la toile de recouvrement du dôme.

Les sangles à cliquet sont conçues pour l'amarrage de chargements pour le transport, elles ne possèdent pas de linguets de sécurité.

Des linguets de sécurité sont également manquants ou endommagés sur les palans à chaîne à levier.

Concernant l'ancrage des haubans sur les blocs de béton, des tiges filetées de 16 mm sont utilisées pour attacher des cornières de métal auxquelles les crochets des palans à chaînes et des sangles à cliquet sont attachés. La résistance de cet assemblage est inconnue.

L'installation des haubans ne suivait pas un plan ou une procédure précise. Ils étaient mis en place en fonction des besoins rencontrés, pour améliorer la stabilité de la structure ou pour la redresser afin de permettre l'alignement des composants à installer. La figure 8 montre les haubans installés pendant les travaux.

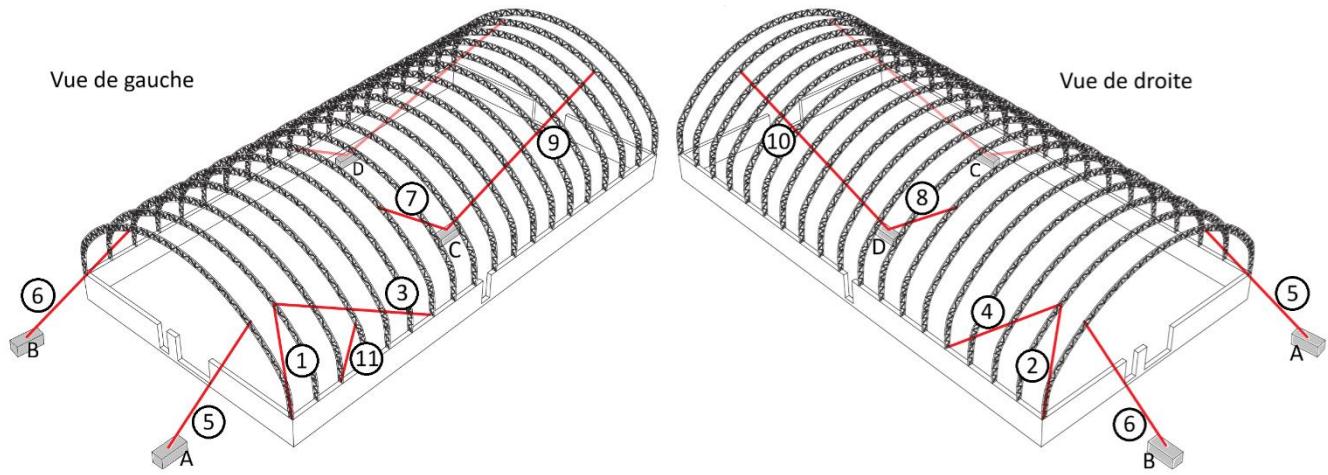


Fig. 8 : *Haubans installés au cours des travaux*
Source : CNESST

Les haubans n°s 1, 2, 3 et 4 ont été mis en place après l'installation de la 3^e arche. Les bases des haubans n°s 3 et 4 étaient initialement attachées au pied de l'arche n° 3, pour être relocalisées au pied des arches n°s 7 et 5 respectivement. Ils sont tendus à l'aide de sangles à cliquet.

Le hauban n° 4 a été retiré lors de l'installation des supports étriers, alors que les travailleurs effectuaient des manœuvres pour corriger la position des premières arches sur le mur de fondation du côté droit.

Les haubans n°s 5, 6, 7 et 8 ont été installés pour assurer la stabilité de la structure avant de quitter le chantier la veille de l'accident. Ils sont amarrés sur des blocs de béton auxquels des plaques d'acier ont été fixées à l'aide d'ancrages à béton (tiges filetées de 16 mm) et tendus avec des palans à chaîne à levier (figure 9A). Les haubans n°s 7 et 8 ont été retirés à la reprise des travaux le jour de l'accident pour être réinstallés en cours de montage.



Fig. 9 : *Ancrage des haubans sur les blocs de béton*
Source : CNESST

Les haubans n°s 9 et 10 ont été installés après la mise en place des 19 arches afin de redresser la structure et permettre l'installation des autres éléments de structure.

Le hauban n° 11 est constitué d'une sangle à cliquet.

Lors de manœuvres pour redresser la structure, à l'aide des haubans n°s 9 et 10, la tige filetée servant d'ancrage sur le bloc de béton C s'est brisée, libérant les haubans n°s 7 et 9. Des travaux étaient en cours pour remettre en place cet ancrage lorsque la structure s'est effondrée.

Une deuxième tige d'ancrage était en cours d'installation sur le bloc de béton D (figure 9B). Après l'effondrement, comme le hauban n° 8 n'est pas relié au bloc de béton D et que ses composants ne sont pas endommagés, nous retenons l'hypothèse que le hauban n° 8 a été détaché pour permettre l'installation de cette deuxième tige d'ancrage.

Les haubans n°s 1, 2, 3, 5, 6, 10 et 11 étaient toujours en place lorsque l'effondrement est survenu. De ceux-ci, seuls le hauban n° 3 est orienté pour retenir la structure contre l'inclinaison vers l'arrière du bâtiment. Celui-ci s'est brisé pendant l'effondrement.

4.2.4 Plans et guide du fabricant/Manuel d'installation

4.2.4.1 Cahier des plans

Les plans sont regroupés dans un document appelé le cahier, ci-après nommé cahier des plans. Ils sont spécifiques au projet, signés et scellés par l'ingénieur M. [REDACTED] J [REDACTED]. Le cahier des plans comporte notamment les plans de la fondation, des arches, de la structure, de l'installation des toiles, des portes et des murs d'extrémités.

Le cahier des plans ne contient pas d'instructions de montage séquentielles. Il comporte cependant les instructions suivantes en ce qui concerne le contreventement temporaire :



La note est accompagnée de la figure suivante :



Fig. 10 : *Extrait du cahier des plans, page 4*
Source : Les bâtiments Mégadôme

¹ Questionné sur la signification de la parenthèse, l'ingénieur M. [REDACTED] J [REDACTED] précise que le point 3 n'est pas nécessaire pour les structures de moins de 30 m.

En résumé, selon ces instructions :

- Au moins deux rangées de longerons doivent être installées en continu et accompagnées des tubes de contreventement de 25 mm qui s'y rattachent.
- Des haubans de corde « polytwist » 10 mm (pièce 1TN003) doivent être installés, à 45 degrés d'inclinaison, de chaque côté de la première arche, puis à chaque 30 m.
- Les haubans doivent être retenus dans le bas par une masse de 1 814 kg (4 000 lb) ou par les ancrages prévus pour les arches ou les tendeurs sur la fondation.

Le cahier des plans est le document de référence utilisé lors du montage. Une copie imprimée est disponible sur les lieux. Le chef d'équipe utilise également une version électronique. Le fabricant réfère l'installateur à ce document lors de questionnements.

4.2.4.2 Le manuel d'installation

Un manuel d'installation est préparé par le fabricant. Il donne des instructions générales (non spécifiques au projet) pour les dômes de 10 à 12 m (33 à 40 pi, arche double) et ceux de 15 à 30 m (50 à 98,5 pi). Le manuel réfère aux dessins techniques du cahier des plans. Cependant, la dénomination des plans diffère de celle utilisée dans le cahier des plans.

La dernière mise à jour date du 20 janvier 2020 et est préparée par M. [REDACTED] K [REDACTED], ingénieur.

Avant l'accident, l'employeur n'avait pas obtenu copie du manuel d'installation, malgré l'installation de plusieurs dômes. Selon les informations obtenues, le fabricant réfère les installateurs au cahier des plans plutôt qu'au manuel.

Dans le guide d'installation, le fabricant émet les indications suivantes :

4. Personnel requis

- *Si vous bâtissez une structure MegaDomeMD pour la première fois, il est fortement recommandé qu'un technicien Harnois soit présent pour toute la durée de l'installation.*
- *Une équipe de quatre (4) travailleurs permettra un déroulement efficace.*

(...)

10. Érection du bâtiment

- *Vérifier les points d'attache (plan GD – Arche);*
- *Installer l'arche de bout;*
- *Placer les écrous sur les ancrages et serrer manuellement;*
- *Contreventer l'arche de part et d'autre et ajuster la verticalité (voir Plan GD – Arche);*
- *Installer 2 longerons et diagonales de chaque côté avant de procéder à l'arche suivante*
- *Suivre les indications selon les étapes de montage en ANNEXE A.*

Le manuel comprend *l'Annexe A* qui constitue une séquence de 17 opérations pour le montage d'un dôme (figure 11).

5	Positionnement 1 ^{ère} arche <i>plan GD-ERCTION</i>	1 2 3 4	-Vérifier les points d'attache, <i>plan GD-ARCHE</i> -À l'aide du palonnier, lever et aligner le pied d'arche avec les bases -Guider les pieds, insérer dans les bases et boulonner. -Attacher câbles temporaires à l'aide des tire-forts, ajuster la verticalité
6	Positionnement 2 ^{ème} arche <i>plan GD-ERCTION</i>	1 2 3 4	-Suivre OP. #5, étapes 1, 2, 3 -Installer 2 rangées de longerons et diagonales de chaque côté entre 1 ^{ère} et 2 ^{ème} arche -Répéter étape #2 avec longerons en porte à faux -Installer câbles entre 1 ^{ère} et 2 ^{ème} et fondation, détails B, G, J
7	Positionnement 3 ^{ème} arche à la 11 ^{ème}	1 2 3	-Suivre OP #5 étapes 1, 2, 3 -Suivre OP #6 étape 3 -Suivre OP #6 étape 4
8a	Positionnement 11 ^{ème} arche	1 2	-Suivre OP. #5 étapes 1, 2, 3, 4 -Suivre OP. #6 étape 4
8b	Structure <i>plan GD-ERCTION</i>	1 2 3	-Installer les rangées de longerons et diagonales restantes premier 100' -Installer câbles de contreventement -Ne pas serrer les serre-câbles 1N9006 à l'arche
9	Positionnement 12 ^{ème} à la 20 ^{ème} arche	1 2 3	-Suivre OP. #5 étapes 1, 2, 3 -Suivre OP. #6 étape 3 -Suivre OP. #6 étape 4

Fig. 11 : *Extrait du manuel d'installation MegaDomeMD*

Source : Les industries Harnois inc.

Selon ces indications :

- La 1^{re} et la 11^e arche doivent être contreventées avec les câbles temporaires.
- Une partie des câbles d'acier qui composent le contreventement permanent doit être installée dès l'installation de la 2^e arche.
- Avant de poursuivre avec la 12^e arche, tous les longerons, les diagonales ainsi que les câbles d'acier de contreventement permanent doivent être installés entre les arches 1 à 11.

4.2.5 Méthode de montage de la structure employée

Il n'y a pas de procédure de montage formelle. La méthode de travail est déterminée par le chef d'équipe. Il donne les directives aux travailleurs au fur et à mesure de l'avancement des travaux. Le cahier des plans lui sert de référence.

La méthode de montage employée est la suivante :

1. Chacune des arches est soulevée avec la grue. Les points de levage utilisés sont ceux prescrits par le cahier des plans. Un palonnier est utilisé, il est fourni par le fabricant. Le matériel de levage et de gréage est sélectionné par le grutier qui tient compte du poids de l'arche et du palonnier. L'arche est positionnée sur la fondation à l'aide de cordes de guidage.

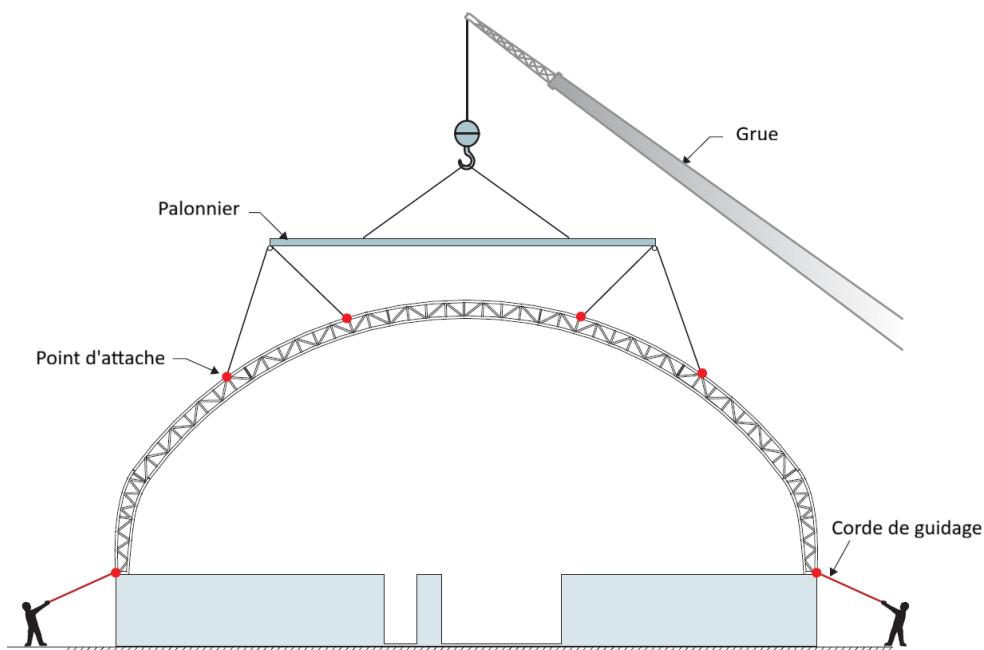


Fig. 12 : Méthode de levage des arches
Source : CNESST

2. L'arche n° 1 est d'abord positionnée et boulonnée sur la fondation, à l'extrémité arrière du bâtiment. Elle est attachée à la nacelle à flèche articulée Genie afin de la retenir en position verticale et la grue en est détachée.
3. L'arche n° 2 est ensuite soulevée avec la grue, positionnée et boulonnée sur la fondation. Trois longerons sont installés entre les deux arches en utilisant les plateformes élévatrices. La grue est détachée et la nacelle maintient les arches n° 1 et n° 2.

4. L'arche n° 3 est positionnée de la même façon et reliée à la 2^e par 3 longerons, montrés en bleu sur la figure suivante.

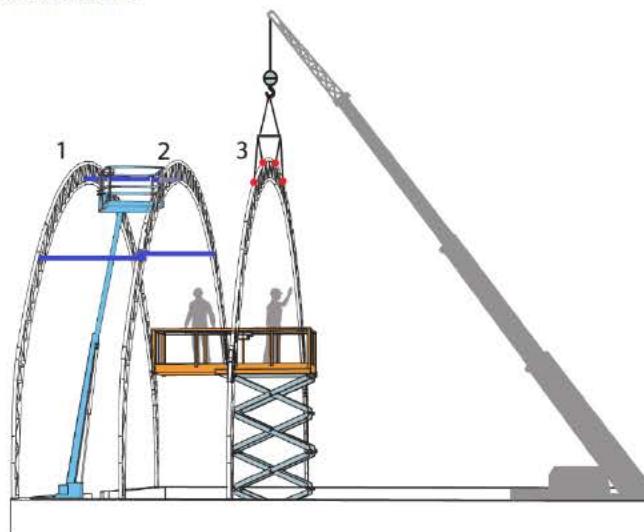


Fig. 13: Installation des arches 1 à 3

Source : CNESST

5. Des haubans sont installés entre l'arche n° 2 et la base des arches n° 1 et n° 3, de chaque côté de la structure. Ils sont tendus avec des tendeurs à courroies. Il s'agit des haubans 1 à 4, tels qu'identifiés à la figure 8 et illustrés en rouge sur la figure suivante. Un niveau est utilisé pour vérifier la verticalité des arches.

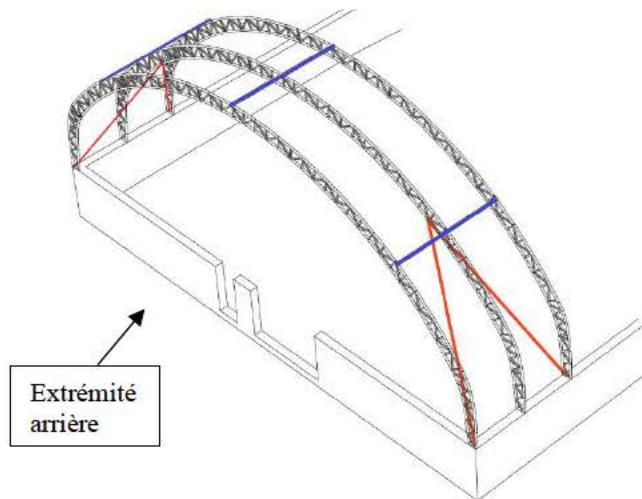


Fig. 14 : Haubans installés entre les arches 1 à 3

Source : CNESST

6. Les arches n° 4 à n° 7 sont installées de la même façon, toutes reliées par 3 longerons.

7. Des haubans supplémentaires sont installés avant de quitter le chantier le 28 mai 2025 en fin de journée. Les haubans n° 1 et n° 2 relient l'arche n° 1 à 2 blocs de béton positionnés à environ 8 m de la structure. Les haubans n° 7 et n° 8 relient l'arche n° 7 à 2 blocs de béton positionnés de façon similaire à l'intérieur des fondations, dans la direction opposée.

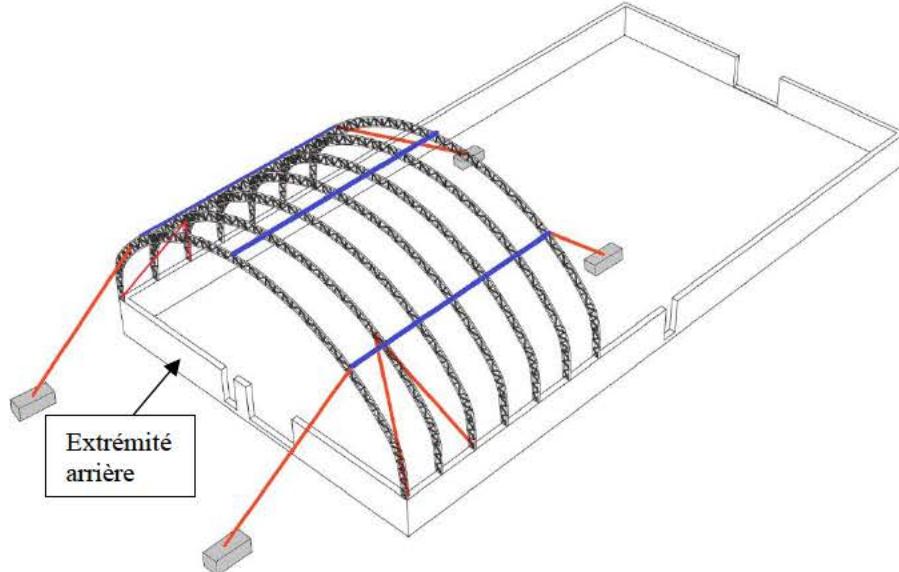


Fig. 15 : Longerons et haubans installés en fin de journée le 28 mai 2025

Source : CNESST

8. Le jour de l'accident, des ajustements sont réalisés avec les haubans pour redresser la structure dont l'inclinaison est visible. Les haubans n° 7 et n° 8 sont retirés et l'installation des arches continue.
9. Pendant que la plupart des travailleurs poursuivent l'installation des arches, un autre travailleur procède à l'ajout de deux longerons supplémentaires sur les arches déjà en place, en débutant par les arches installées la veille.
10. Des modifications sont apportées à la position des haubans n° 3 et n° 4 au cours des travaux. Le hauban n° 11 est ajouté. La figure suivante illustre l'état des travaux après l'installation de la 11^e arche.

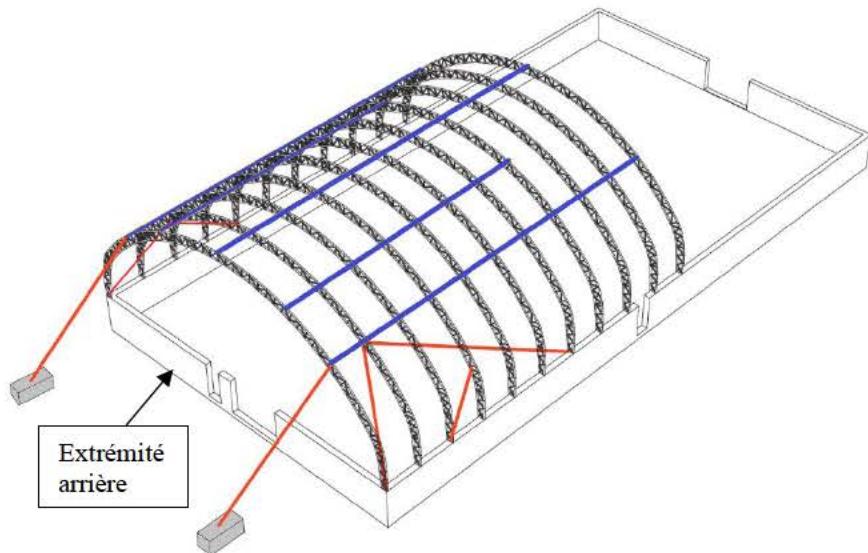


Fig. 16 : Longerons et haubans après l'installation

de la 11^e arche, le 29 mai 2025

Source: CNESST

11. Pendant que l'installation des arches se poursuit, des travailleurs procèdent à l'installation des supports étriers à la base des arches.
12. Au cours de l'installation des arches n° 12 à n° 19, les haubans n° 7 et n° 8 sont remis en place.
13. Une fois les 19 arches installées, la configuration est telle que montrée sur la figure 17.

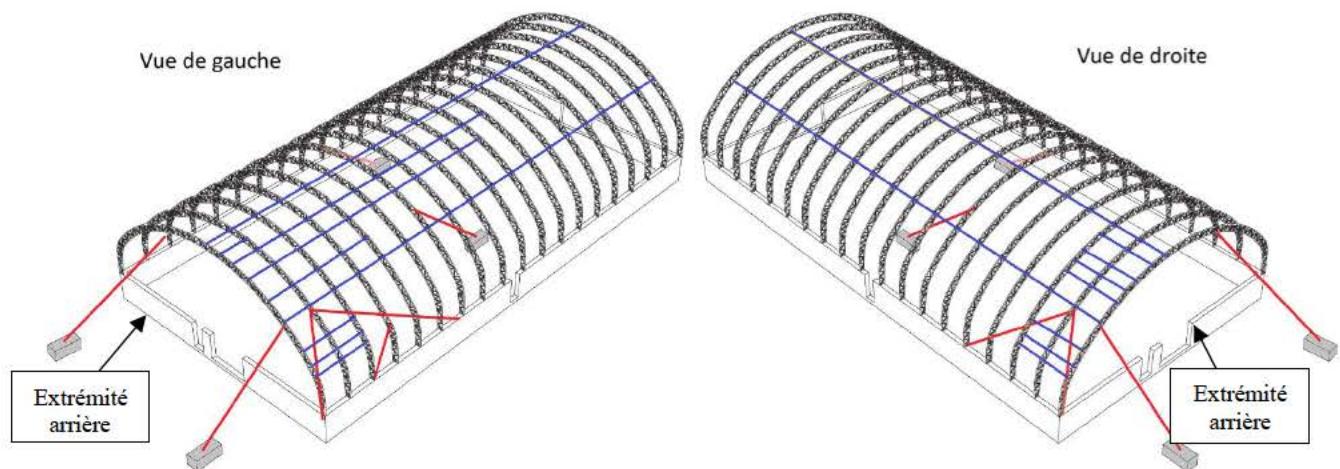


Fig. 17 : Longerons et haubans après l'installation des 19 arches

Source : CNESST

14. Des travailleurs débutent l'installation des tubes de contreventement de 25 mm, mais les trous ne s'alignent pas. La structure penche vers l'avant du bâtiment. Les haubans n° 9 et n° 10 sont installés pour la redresser (figure 8). Pendant la manœuvre, un ancrage cède sur le bloc C. Alors, les haubans n° 7 et n° 9 ne sont plus attachés.
15. Pendant l'installation des supports étriers, les travailleurs constatent que le côté droit des premières arches (les arches n° 2 à n° 5 environ) est mal positionné. Le positionnement

doit être rectifié avant de poursuivre l'installation des supports étriers. Le hauban n° 4, qui relie les arches n° 2 et n° 5, est retiré et le chariot élévateur à mât télescopique est utilisé pour tenter de soulever la base de l'arche. Les haubans restants sont illustrés à la figure 18.

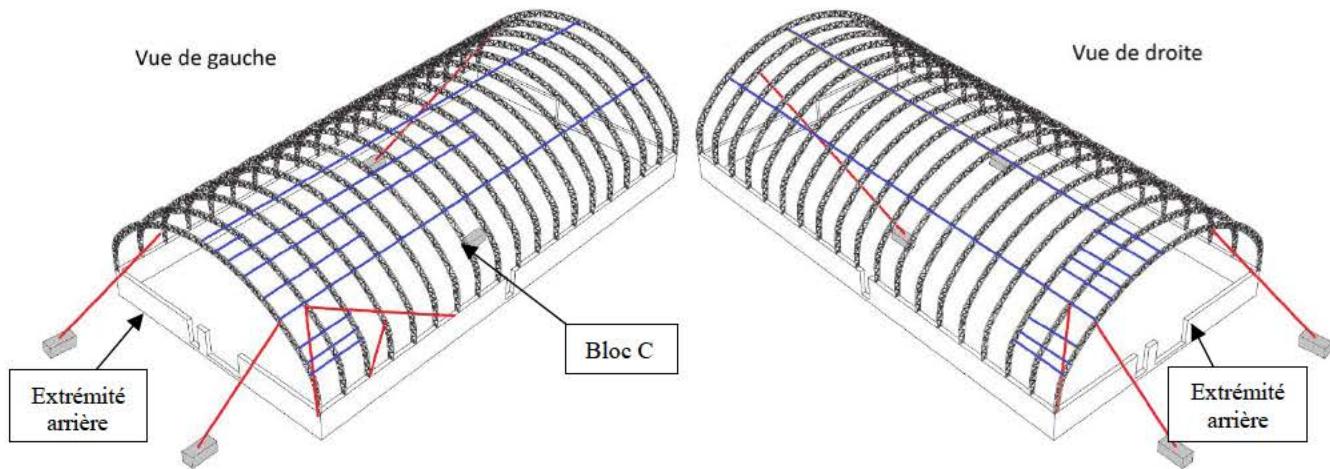


Fig. 18 : Longerons et haubans avant l'effondrement de la structure
Source : CNESST

16. Finalement, le chef d'équipe suspend les manœuvres de repositionnement pour réinstaller un ancrage au bloc C et attacher les haubans n° 7 et n° 9.
17. Un trou est foré sur le bloc C pour y réinstaller l'ancrage qui a cédé. Un trou est également foré sur le bloc D et un deuxième boulon d'ancrage y est partiellement inséré.
18. Pendant que le chef d'équipe, accompagné de deux travailleurs, s'affaire à réinstaller les haubans n° 7 et n° 9, deux autres équipes de travailleurs prennent place dans les deux plateformes élévatrices pour débuter l'installation des tubes de contreventement de 25 mm. Pendant qu'ils se positionnent, la structure s'effondre vers l'arrière du bâtiment.

4.2.6 Protection contre les chutes

Les travailleurs qui prennent place dans les appareils de levage portent un harnais de sécurité relié à un système d'ancrage par une liaison d'arrêt de chute.

4.2.7 Informations extraites du rapport d'expertise

Le mandat d'expertise technique confié à un ingénieur expert de la CNESST a permis de préciser :

- « Le contreventement temporaire mis en place lors du montage des arches n'était pas conforme aux notes spécifiées dans le plan de montage, notamment celles relatives au «câblage temporaire». Malgré la présence de plusieurs cordes au moment de l'accident, une seule aurait été sollicitée en traction dans le sens du basculement. Cela équivaut à un contreventement minimal, impliquant une seule corde pour stabiliser les 19 arches installées.
- La corde ayant résisté au basculement aurait subi une rupture ou une élongation excessive, proche de sa limite maximale avant rupture. Cette situation aurait permis le transfert des forces latérales engendrées par l'instabilité des arches durant le montage. De plus, des efforts supplémentaires dus aux forces de compression dans les arches auraient accentué les forces latérales dans les liens continus, sollicitant davantage les ancrages.
- L'analyse du comportement des cordes en polypropylène sous l'effet de la traction montre qu'elles peuvent subir des elongations importantes en raison de leur élasticité. Selon les résultats obtenus, même avec l'utilisation de quatre cordes en traction, l'elongation observée ne permet pas d'assurer une verticalité adéquate des arches. Par conséquent, le transfert des forces latérales vers les ancrages devient possible, bien que ces derniers ne soient pas conçus pour résister à ce type de sollicitation, ce qui peut entraîner leur rupture.
- La rupture des ancrages des arches 1 et 2 a initié un enchaînement de ruptures similaires au niveau des autres arches, menant à l'effondrement complet de la charpente du bâtiment en dôme ».

Concernant la résistance des ancrages, nous notons également le passage suivant :

« La résistance aux forces latérales devrait être assurée par un système de contreventement. Les ancrages des arches ne sont pas conçus pour assurer cette fonction, ni durant l'installation, ni en conditions de service. »

Le rapport d'expertise se trouve intégralement à l'annexe C.

4.2.8 Lois et règlementation

Cette section présente certains articles de la Loi sur la sécurité et la santé du travail (LSST) ainsi que des règlements applicables sur le chantier se rapportant aux événements du 29 mai 2025.

La Loi sur la sécurité et la santé du travail (LSST) prévoit, à l'article 51 :

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

[...]

3° s'assurer que l'organisation du travail et les méthodes et techniques utilisées pour l'accomplir sont sécuritaires et ne portent pas atteinte à la santé du travailleur;

[...]

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

[...]

9° informer adéquatement le travailleur sur les risques reliés à son travail et lui assurer la formation, l'entraînement et la supervision appropriée afin de faire en sorte que le travailleur ait l'habileté et les connaissances requises pour accomplir de façon sécuritaire le travail qui lui est confié;

[...]

Le Code de sécurité pour les travaux de construction (CSTC) prévoit :

Article 2.4.2. i)

Le personnel de la direction et de la surveillance travaillant principalement et habituellement sur un chantier de construction ainsi que les travailleurs œuvrant sur un chantier de construction qui, le 18 juillet 2019, ne détiennent pas une attestation décernée par la Commission ou par un organisme reconnu par elle, aient réussi le cours Santé et sécurité générale sur les chantiers de construction.

Article 2.12.1

Toute charpente doit être calculée, construite, placée, appuyée, contreventée et haubanée afin de résister à toute charge qui pourrait y être imposée pendant la construction ou la démolition.

Article 3.24.10

Procédure de montage: *En plus d'être effectués conformément au plan de montage prévu à l'article 3.24.9, les travaux doivent être exécutés selon une procédure élaborée par l'employeur. Cette procédure doit contenir notamment les renseignements suivants:*

- 1° la méthode d'installation et les étapes du montage de la charpente;*
- 2° les mesures à prendre pour assurer la stabilité des éléments de la charpente;*
- 3° les mesures de protection des travailleurs contre les chutes.*

Outre les exigences prévues au premier alinéa, la procédure de montage doit contenir la procédure de levage prévue à l'article 3.24.15.

4.3 Énoncés et analyse des causes

4.3.1 Alors que des travailleurs se trouvent sous la structure du dôme en cours de montage, celle-ci s'effondre, atteint mortellement un travailleur et en blesse trois autres.

Le 29 mai 2025, le chef d'équipe est situé au sol, sous la structure du dôme en cours de montage, accompagné de deux travailleurs. Ils s'affairent à ancrer un hauban sur un bloc de béton. Pendant ces travaux, la structure composée de 19 arches s'effondre vers l'arrière du bâtiment et une arche le heurte mortellement à la tête. Une autre arche s'écrase sur la jambe d'un des deux travailleurs au sol.

Lors de l'effondrement, une équipe de deux travailleurs se trouve dans une plateforme élévatrice, située sous la structure, en position élevée, près de l'extrémité arrière du bâtiment. Les arches renversent la plateforme élévatrice, ce qui cause la chute de ses deux occupants. Les travailleurs subissent de multiples blessures.

Cette cause est retenue.

4.3.2 La méthode de travail utilisée pour le montage de la structure du dôme est dangereuse parce qu'elle n'assure pas sa stabilité pendant son installation.

Plusieurs non-conformités ont été notées par rapport à la méthode de travail utilisée par les travailleurs lors du montage de la structure du dôme qui s'est effondré le 29 mai 2025.

Au départ, les travailleurs maintiennent la première arche à l'aide d'une nacelle alors que le cahier de plans prescrit de sécuriser celle-ci à l'aide de quatre haubans installés à 45° d'inclinaison. Lorsqu'ils installent finalement des haubans, ils n'utilisent pas la corde destinée à cet effet. La résistance de la corde qu'ils utilisent n'offre qu'environ 50 % de la résistance de celle prévue.

La configuration des haubans mis en place ne suit pas celle prescrite par le fabricant, soit quatre haubans sur la première arche ainsi qu'à chaque 30 m (100 pi). Ceux-ci ne sont pas installés selon un ordre prédéterminé, mais plutôt de façon réactive pour corriger les problèmes de verticalité. Ainsi, le nombre d'haubans installés pour prévenir l'inclinaison de la structure vers l'avant est beaucoup plus élevé que le nombre installé pour prévenir l'inclinaison vers l'arrière.

Au fil des travaux, alors que certains haubans sont détachés, des manœuvres de redressement causent le bris d'un ancrage auquel s'attachait deux autres haubans. La résistance des ancrages installés sur les blocs de béton n'avait d'ailleurs pas été évaluée.

Lorsque survient l'accident, un seul hauban était encore en place pour prévenir l'inclinaison vers l'arrière du bâtiment.

D'autres éléments démontrent la nature improvisée de la méthode de travail employée. Les blocs de béton utilisés pour l'amarrage des haubans ont une masse d'environ 1 000 kg alors que le fabricant prescrit des blocs de béton de 1 814 kg. Les sangles à cliquet utilisées pour tendre les haubans ne sont pas conçues pour cet usage puisque leurs crochets n'ont pas de linguet de sécurité pour éviter le détachement accidentel. Également, certains tendeurs à chaîne utilisés n'ont pas de linguets de sécurité. La méthode utilisée pour le redressement des ancrages compromet leur solidité puisque des fissures ont été constatées dans le béton après ces manœuvres.

Finalement, en ce qui concerne la séquence de montage des composants de la structure, le fabricant prescrit l'installation, dès les premières arches, d'au moins deux liens longitudinaux ainsi que de leurs tubes de contreventement de 25 mm. Ces tubes de contreventement n'ont pas

étaient installés lors du montage des arches. Le manuel d'installation, qui n'avait pas été remis à l'employeur, comporte davantage de précautions visant à assurer la stabilité de la structure. On y prévoit notamment l'installation de tous les longerons, de tous les tubes de contreventement 25 mm et de tous les câbles d'acier de la première section de 11 arches, et ce, avant de poursuivre l'érection de la structure. Cette étape n'a pas été réalisée lors du montage du dôme impliqué dans l'accident.

Selon l'article 51.3 de la LSST, l'employeur doit s'assurer que l'organisation du travail et les méthodes et les techniques utilisées pour l'accomplir sont sécuritaires. Le montage de la structure du dôme a été entrepris sans qu'une procédure de montage n'ait été élaborée par l'employeur. Si une procédure de montage avait été élaborée, comme le prescrit l'article 3.24.10 du CSTC, les travailleurs auraient pu s'y référer et les problématiques citées plus haut auraient pu être évitées.

En conclusion, la combinaison des manquements lors du montage du dôme a conduit à une situation dans laquelle le contreventement de la structure était insuffisant pour assurer sa stabilité.

Cette cause est retenue.

SECTION 5

5 CONCLUSION

5.1 Causes de l'accident

- Alors que des travailleurs se trouvent sous la structure du dôme en cours de montage, celle-ci s'effondre, atteint mortellement un travailleur et en blesse trois autres.
- La méthode de travail utilisée pour le montage de la structure du dôme est dangereuse parce qu'elle n'assure pas sa stabilité pendant son installation.

5.2 Recommandations

La CNESST transmettra les conclusions de son enquête à l'Association de la construction du Québec (ACQ), à l'Association des professionnels de la construction et de l'habitation du Québec (APCHQ), à l'Association des entrepreneurs en construction du Québec (AECQ) et à la Commission de la construction du Québec (CCQ).

La CNESST transmettra également les conclusions de son enquête à toutes les associations sectorielles paritaires ainsi que l'ensemble des gestionnaires de mutuelles de prévention.

ANNEXE A – Liste des accidentés

Nom, prénom : B [REDACTED]

Sexe : Masculin

Âge : [REDACTED]

Fonction habituelle : [REDACTED]

Fonction lors de l'accident : Chef d'équipe

Expérience dans cette fonction : [REDACTED]

Ancienneté chez l'employeur : [REDACTED]

Syndicat : Aucun

Nom, prénom : F [REDACTED]

Sexe : Masculin

Âge : [REDACTED]

Fonction habituelle : [REDACTED]

Fonction lors de l'accident : [REDACTED]

Expérience dans cette fonction : [REDACTED] [REDACTED]

Ancienneté chez l'employeur : [REDACTED] [REDACTED]

Syndicat : Aucun

Nom, prénom : H 

Sexe : Masculin

Âge : 

Fonction habituelle : 

Fonction lors de l'accident : 

Expérience dans cette fonction : 

Ancienneté chez l'employeur : 

Syndicat : Aucun

Nom, prénom : G 

Sexe : Masculin

Âge : 

Fonction habituelle : 

Fonction lors de l'accident : 

Expérience dans cette fonction : 

Ancienneté chez l'employeur : 

Syndicat : Aucun

ANNEXE B – Rapport d'expertise



RAPPORT D'EXPERTISE

Rapport d'expertise sur les défaillances rencontrées lors de l'effondrement d'un bâtiment en dôme en construction

Rapport présenté à : Claudia Bernard, [REDACTED] et
inspectrice

Mathieu Lamy, inspecteur

Service Prévention Inspection Montérégie Est

CNESST

Préparé par :

Hussein Elahmed, ing.

Direction générale de la réglementation, du soutien et de l'expertise

CNESST

Hussein Elahmed



Signé avec ConsignO Cloud (31/10/2025)

Vérifiez avec verifilo.com ou Adobe Reader.

Numéro de l'OIQ : 5060399

31 octobre 2025

Résumé

Le présent rapport vise à analyser les causes de l'effondrement d'un système de toiture de type dôme survenu le 29 mai 2025 sur un chantier de construction à Sorel-Tracy. L'événement a entraîné la mort d'un travailleur et des blessures à d'autres. L'expertise a pour objectif d'évaluer la conformité du montage de la charpente aux normes en vigueur, d'identifier les défaillances techniques et organisationnelles, et de déterminer les facteurs ayant contribué à l'effondrement.

L'analyse repose sur une visite de chantier, l'examen des plans de montage et du manuel d'installation du fabricant, des observations techniques sur les lieux de l'accident, des calculs structuraux selon la norme CSA-S16, ainsi qu'une évaluation des composantes utilisées pour le contreventement temporaire, notamment les cordes en polypropylène et les ancrages chimiques.

Les principaux constats sont les suivants :

- Le système de contreventement temporaire mis en place lors du montage des arches métalliques était incomplet et non conforme aux spécifications du fabricant.
- Une seule corde aurait été sollicitée en traction pour stabiliser l'ensemble des 19 arches, ce qui est insuffisant pour assurer leur stabilité.
- Les cordes en polypropylène utilisées présentent une élasticité trop élevée pour garantir une verticalité adéquate des arches, même en cas d'installation conforme.
- Les forces latérales générées par l'instabilité des arches ont été transférées aux ancrages, qui n'étaient pas conçus pour résister à de telles sollicitations.
- Les ancrages des arches 1 et 2 ont cédé sous l'effet de ces forces, entraînant un effondrement en chaîne de type « effet domino ».

L'effondrement de la charpente du bâtiment en dôme résulte d'un contreventement temporaire inadéquat, d'une mauvaise mise en tension des haubans, et de l'utilisation de matériaux inappropriés pour assurer la stabilité des arches durant le montage. La rupture des ancrages, causée par des sollicitations excessives, a déclenché un enchaînement de défaillances structurelles menant à l'effondrement complet de la toiture.

Table des matières

Résumé.....	2
1 Mise en contexte	4
2 Description du mandat	4
3 Méthodologie	4
4 Informations recueillies	5
5 Analyse	11
5.1 Description des arches métalliques	11
5.2 Description du contreventement temporaire	13
5.3 Contreventement temporaire au moment de l'accident	16
5.4 Commentaires sur le câblage temporaire	18
5.5 Analyse du contreventement temporaire des arches	19
5.5.1 Calcul des forces dans liens continus.....	20
5.5.2 Analyse de la performance des cordes	23
5.6 Résistance des ancrages.....	25
6 Conclusion	27
7 Références.....	27
Annexe 1.....	28
Résistance des ancrages	28
Annexe 2.....	32
Procédure de montage	32

1 Mise en contexte

Un accident de travail mortel est survenu le 29 mai 2025 sur un chantier de construction situé au 1696, route Marie-Victorin à Sorel-Tracy. L'événement concerne l'effondrement d'un système de toiture de type dôme, composé de 19 arches métalliques en acier galvanisé à chaud, modèle XP100HHD, fabriquées par la compagnie Industries Harnois (Serres / MegaDome).

Ces arches étaient installées sur un muret de béton de 60 mètres (198 pieds) de longueur, espacées de 3,3 mètres (11 pieds) centre à centre. Le montage de la charpente a débuté le 28 mai 2025, avec l'installation de quelques arches. Le reste de la structure a été complété le lendemain. En début d'après-midi du 29 mai, alors que toutes les arches étaient érigées sur le muret, un effondrement en chaîne de type « effet domino » s'est produit, entraînant la chute de l'ensemble des arches métalliques vers l'avant du bâtiment.

Dans le cadre de l'enquête d'accident réalisée par la CNESST à la suite du décès d'un travailleur et des blessures à plusieurs autres, une expertise a été demandée au réseau d'expertise en prévention-inspection (REPI).

2 Description du mandat

Le mandat de cette expertise est d'identifier les défaillances ayant contribué au basculement des arches métalliques.

3 Méthodologie

L'approche adoptée pour cette analyse consiste, dans un premier temps, à comparer les instructions relatives au contreventement temporaire, figurant dans le plan de montage fourni par le fabricant, avec les travaux réalisés sur le chantier. Aucune procédure de montage spécifique, consignée dans un document, ne semble avoir été prévue par le maître d'œuvre pour les travaux de construction du bâtiment concerné. Toutefois, quelques instructions concernant le contreventement temporaire figurent dans le plan de montage fourni par le fabricant. De plus, l'annexe A du manuel d'installation du fabricant pour MegaDomeMD 33'-40' (Arche double) et MegaDomeMD 50' à 98'6" contient des instructions additionnelles concernant le montage des arches métalliques.

Dans un deuxième temps, l'efficacité du contreventement temporaire mis en place est analysée en fonction des exigences de la norme CSA-S16. Un calcul des forces minimales dans les éléments de contreventement est effectué à l'aide de la

méthode dite « simplifiée » telle que prescrite dans la norme CSA-S16. Enfin, une analyse supplémentaire est élaborée concernant les cordes en polypropylène utilisées pour haubaner les arches au cours du montage. L'utilisation de cordes en fibre est peu fréquente dans les ouvrages temporaires servant à contreventer les éléments d'une charpente en acier. Elles doivent faire l'objet d'une vérification rigoureuse afin d'évaluer si leur utilisation est sécuritaire dans un contexte de chantier.

4 Informations recueillies

À la suite de cet accident, une visite de chantier a été effectuée le 9 juin. Lors de cette visite, un effondrement ressemblant à un effet "domino" a été constaté. Les dix-neuf arches métalliques ont basculé vers l'entrée du bâtiment (côté gauche de la photographie 1). Quelques appareils de levage de personnes étaient présents sur les lieux de l'accident, dont une plateforme élévatrice de type ciseaux qui a été renversée, ainsi qu'une plateforme de type nacelle qui a été écrasée au sol. (Photographie 1 et 2). Des blocs de béton, utilisés pour l'ancrage des cordes de contreventement, étaient présents sur les lieux de l'accident, dont deux étaient sur la dalle du béton à l'intérieur du bâtiment, et deux autres étaient à l'extérieur du bâtiment du côté avant.



Photographie 1 : Vue aérienne de l'effondrement par effet "domino" des arches métalliques. (Source CNESST)



Photographie 2 : appareils de levage de personnes présents sur les lieux de l'accident.
(Source CNESST)

Les arches métalliques comportaient trois principaux liens continus reliant toutes ces arches d'une extrémité à l'autre. Un lien continu était situé au niveau des sommets des arches, et deux autres sur les côtés (photographie 1). D'autres liens non-complétés étaient aussi installés sur les arches. Les liens continus sont constitués par des sections de tubes ovales en acier galvanisé, reliés aux membrures en diagonal des arches à l'aide de boulons. En outre, il était possible de remarquer la présence de plusieurs cordes jaunes attachées à quelques arches, les attaches sont sous forme de "nœuds" réalisés manuellement (Photographie 3 et 4). La plupart des attaches sont situées sur les membrures inférieures des arches métalliques.



Photographie 3 : Une corde jaune attachée à une arche métallique. (Source CNESST)



Photographie 4 : Une corde jaune attachée à une arche métallique. (Source CNESST)

De plus, certaines cordes étaient reliées à des sangles pour former ce qui devrait être des haubans pour contreventer les arches pendant leur installation (Photographies 5 et 6).



Photographie 5 : Une corde reliée à un sangle. (Source CNESST)



Photographie 6 : Une corde reliée à un sangle. (Source CNESST)

Selon les spécifications sur une des bobines, les cordes sont en polypropylène dont le diamètre est de 10 mm (3/8") :



Photographie 7 : Spécifications des cordes utilisées pour haubaner les arches métalliques (Source CNESST)

Comme mentionné, quatre blocs en béton ont été utilisés pour l'ancrage des haubans. Chaque bloc comportait une cornière servant de point d'ancrage (photographie 8). Ces cornières étaient fixées à l'aide de boulons insérés dans le béton et reliées aux haubans au moyen de tireforts à chaîne, accrochés à une manille installée sur la cornière. Les tireforts ont probablement été utilisés pour l'ajustement ou la mise en tension des haubans.



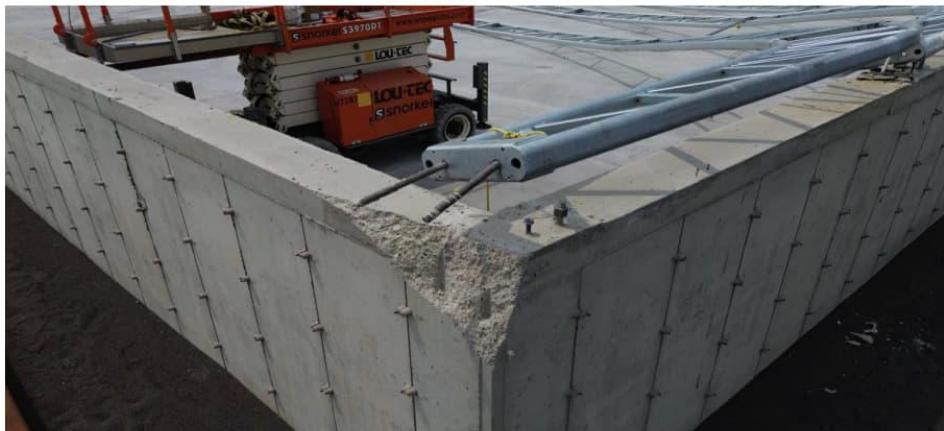
Photographie 8 : Une cornière d'ancrage reliée à un "tirefort" manuel à chaîne. (Source CNESST)

Certains haubans étaient constitués uniquement de sangles reliant une arche métallique à un point d'ancrage situé sur le muret de béton (photographie 9).



Photographie 9 : Photographie 9 : Un hauban composé par un sangle reliant une arche à un tendeur et un point d'ancrage sur le muret de béton. (Source CNESST)

La rupture de l'ensemble des tiges d'ancrage des arches métalliques a également été observée sur place. L'ancrage des arches sur le muret de béton avait été réalisé à l'aide de tiges ou de goujons filetés. Les modes de rupture observés incluent la rupture des goujons (par traction ou arrachement) ainsi que l'éclatement du béton à l'emplacement de ces goujons (photographie 10).



Photographie 10 : Éclatement du béton au niveau de l'ancrage d'une arche. (Source CNESST)

Les photographies suivantes illustrent un arrachement et une déformation excessive des tiges d'ancrage des arches intermédiaires. On y remarque également la déformation de certaines composantes, telles que les cornières d'attache au niveau des plaques inférieures des arches.



Photographie 11 : Arrachement des tiges d'ancrage d'une arche intermédiaire. (Source CNESST)



Photographie 12 : Déformation excessive (pliage) d'une tige d'ancrage d'une arche intermédiaire. (Source CNESST)

La photographie suivante montre un autre mode de rupture observé à l'extrémité avant du bâtiment : un goujon fracturé partiellement resté dans le béton, un autre complètement arraché, ainsi que l'arrachement de morceaux de béton.



Photographie 13 : Arrachement d'une tige d'ancrage et fracturation d'un autre en traction
(Source CNESST)

En résumé, l'effondrement des dix-neuf arches métalliques a entraîné la rupture généralisée des ancrages sur le muret de béton. Ces observations remettent en question l'efficacité du système de contreventement temporaire mis en place.

5 Analyse

5.1 Description des arches métalliques

Les arches métalliques du bâtiment en forme de dôme sont des structures en acier galvanisé formé à froid, dont le poids est de 966 kg (2 145 lb). Fabriquées en arches doubles avec une portée de 30 m (98 pi 6 po), elles constituent les arches les plus élancées du modèle XP de la compagnie Industries Harnois (Serres / MegaDome).

Chaque arche métallique est composée de sept sections modulaires, cinq poutrelles courbées et deux sections verticales en bas de chaque arche (Figure 1). Ces éléments sont reliés par des assemblages boulonnés. Les membrures supérieures et inférieures des arches sont constituées par des tubes ovales. Les membrures en diagonal sont des tubes rectangulaires assemblées par soudages aux membrures supérieures et inférieures. Selon le fabricant, la nuance de l'acier utilisé est ASTM A500 dont la limite d'élasticité est égale à 345 MPa (50 psi).



Figure 1 : Image modifiée à partir du plan GD-PRESENTATION-231737

Deux types d'ancrage sont prévus pour la fixation des arches métalliques :

- Les arches situées aux extrémités avant et arrière du bâtiment (arches 1 et 19) sont fixées sur le muret de béton à l'aide de deux goujons filetés 25 mm x 15 po, coulés dans le béton et insérés dans la base de l'arche.
- Les arches intermédiaires (arches 2 à 18) sont fixées par deux tiges filetées 5/8 po x 10 po, insérées dans des cornières boulonnées à la base des arches (Figure 2). Ces ancrages sont de type chimique, installés après la coulée à l'aide d'un adhésif de marque Flo-Rok.

Un troisième point d'ancrage, sous forme de tige latérale, devait être installé ultérieurement sur le côté du muret (Figure 2). Au moment de l'accident, ces ancrages n'avaient pas encore été mis en place.



Figure 2 : Image tirée du plan MD-FONDATION-231737

Il est à noter que d'autres ancrages et tendeurs sont installés à proximité de chaque arche. Ces éléments sont destinés pour le contreventement permanent de la charpente (câblage en acier), et pour l'installation de la toile dans une étape ultérieure. Il est possible que certains de ces éléments aient été utilisés temporairement lors du montage.

5.2 Description du contreventement temporaire

Aucun document spécifique n'a été identifié concernant la procédure de montage de la charpente. Selon l'article 3.24.10 du Code de sécurité pour les travaux de construction (CSTC), les travaux de montage doivent être exécutés selon une procédure élaborée par l'employeur. Cette procédure doit inclure notamment :

- La méthode d'installation et les étapes du montage de la charpente;
- Les mesures à prendre pour assurer la stabilité des éléments de la charpente.

Toutefois, le plan de montage (cahier de plans associé au projet 231737 – Les Habitations Richard Hébert inc.) contient quelques instructions relatives au contreventement temporaire lors du montage des arches métalliques. Le dessin GD-ARCHE-231737 (page 4/16) présente des notes concernant le « câblage temporaire » (Figure 3)



Figure 3 : Image tirée du dessin GD-ARCHE-231737

Selon ces notes, le contreventement temporaire consiste à mettre en place les éléments suivants :

- Un minimum de deux liens longitudinaux en profilé ovale, avec des contreventements de 25 mm ($\emptyset 1$ po) à chaque connexion avec une arche (Figure 4);
- Haubaner l'arche de départ à l'aide de deux cordes, installées à l'endroit des assemblages avec chaque lien continu. Les cordes doivent être disposées à 45° de chaque côté de l'arche. Elles sont de marque POLYTWIST, diamètre 10 mm (3/8 po).



Figure 4 : Détail du contreventement 25 mm ($\varnothing 1$) du lien continu sur une arche. Image tirée du dessin GD-STRUCTURE-231737 1/2.

Toujours selon les notes, un câblage temporaire peut être ajouté tous les 30 m, si nécessaire. Il est également précisé qu'il ne faut pas quitter le chantier si la structure est uniquement retenue par le câblage temporaire. Ainsi, des câbles de contreventement en acier (Figure 5) doivent être installés avant de quitter le chantier.



Figure 5 : Contreventement par câblage en acier. Image tirée du dessin GD-STRUCTURE-231737 2/2

Les notes ne fournissent aucune indication supplémentaire sur les méthodes d'attacher les cordes, ni sur les arches, ni sur les points d'ancrage aux blocs de béton. Cependant, l'annexe A du manuel d'installation du fabricant pour MegaDomeMD 33'-40' (Arche double) et MegaDomeMD 50' à 98'6" précise que les câbles temporaires doivent être attachés à l'aide de tireforts, et que la verticalité des arches doit être ajustée (Annexe 2, Figure 19). Concernant cette verticalité, le manuel exige que les arches soient positionnées avec une tolérance de $\pm 2,5^\circ$ (Tolérance des fondations, page 3/13). Toujours dans l'annexe A, le fabricant exige que les câbles en acier, qui font partie du contreventement permanent, soient installés au fur et à mesure de l'installation des arches (opération 6 du montage). Le serrage des serre-câbles (éléments reliant les câbles aux arches) doit être effectué à la fin de l'installation de toutes les arches.

5.3 Contreventement temporaire au moment de l'accident

Tel que mentionné précédemment, plusieurs cordes ont été utilisées pour haubaner les arches métalliques. Certaines étaient combinées avec des sangles. Selon les observations sur place et les informations recueillies, bien que plusieurs haubans aient été installés, un seul hauban aurait été effectivement mis en tension au moment du basculement. Autrement dit, un seul hauban aurait contribué à résister au mouvement des arches.

Les autres cordes ou haubans n'auraient pas contribué à la résistance au basculement pour les raisons suivantes :

- Ils n'étaient pas attachés à leurs ancrages, soit en raison d'un bris, soit parce que leur installation n'était pas complétée.
- La disposition de certaines cordes ne permettait pas leur mise en tension lors du basculement. Les cordes orientées dans le sens du basculement étaient soumises à la compression, et donc incapables de résister au mouvement.

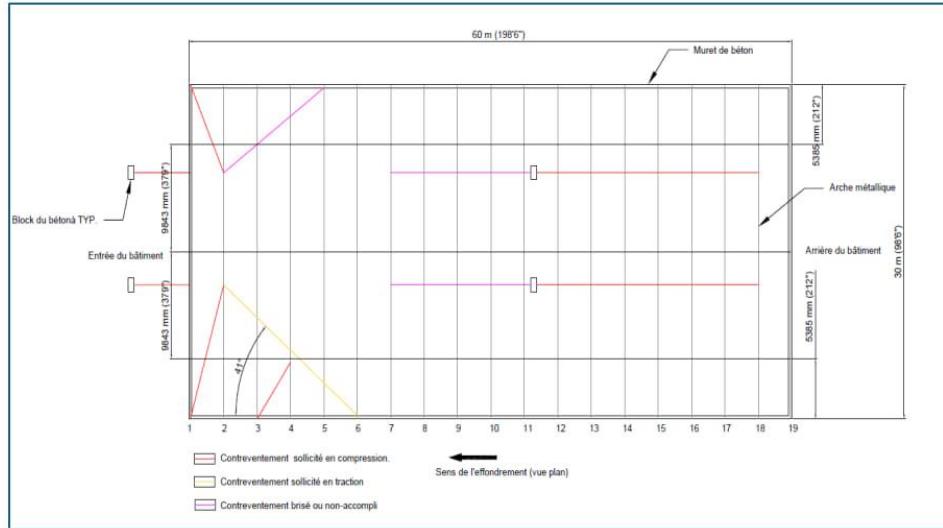


Figure 6 : « Câblage temporaire » tel que réalisé au moment de l'accident (vue en plan) (source CNESST)

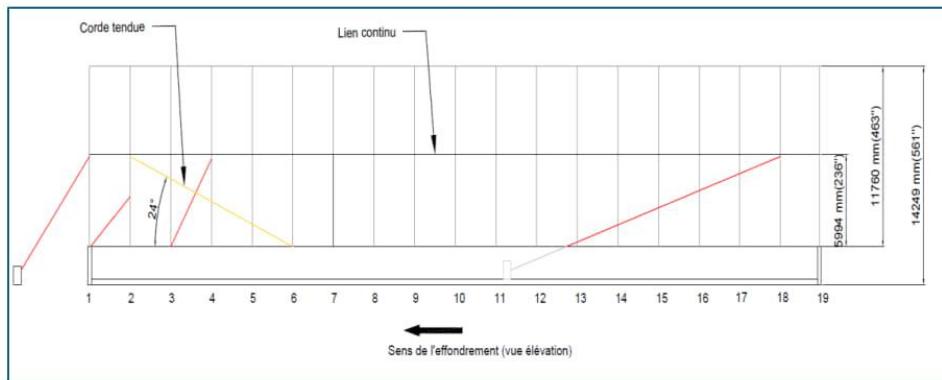


Figure 7 : "Câblage temporaire" tel que réalisé au moment de l'accident. (Vue élévation) (source CNESST)

Les lignes en jaune représentent la corde qui aurait été sollicitée en traction lors du basculement. Les lignes en rouge représentent les cordes qui auraient été comprimées dans le sens du basculement. Les lignes en magenta représentent des cordes qui n'ont pas été attachées, possiblement en raison d'un bris d'ancrage ou de travaux non complétés. En conséquence, une seule corde était sous tension au moment de l'accident (figure7). Il est important de rappeler que, selon les spécifications du « câblage temporaire », quatre cordes devraient être installées

pour résister par traction en cas de mouvement des arches : deux sur l'arche de départ, et deux autres ajoutées tous les 30 m.

5.4 Commentaires sur le câblage temporaire

En comparant les notes du plan de montage et les spécifications de l'annexe A du manuel d'installation du fabricant pour MegaDomeMD 33'-40' (Arche double) et MegaDomeMD 50' à 98'6", les points suivants peuvent être relevés :

- L'arche de départ n'était haubanée que d'un seul côté. Deux cordes ont été attachées aux blocs de béton à l'extérieur du bâtiment (côté gauche, figure 7), mais aucun hauban n'a été observé de l'autre côté.
- À l'exception de la deuxième arche, toutes les arches haubanées étaient attachées uniquement d'un côté (avant ou arrière). Selon la force de mise en tension initiale, cela aurait pu générer des efforts supplémentaires dans les liens continus, en raison de l'absence de balancement des haubans. De plus, comme illustré à la figure 7, le nombre de haubans non balancés tirant vers l'avant du bâtiment (sens du basculement) est supérieur au nombre de haubans pouvant résister au basculement (un seul). Cela aurait favorisé le mouvement vers l'avant, ce qui est cohérent avec l'effondrement observé.
- Aucun élément du câblage en acier n'avait été installé au moment de l'accident. Selon l'opération 6 du montage (annexe A du manuel), ces éléments doivent être mis en place au fur et à mesure de l'installation des arches.
- Les contreventements de 25 mm (Ø1 po), destinés à renforcer les jonctions entre les liens continus et les arches, n'avaient pas été installés. Ces contreventements sont essentiels pour limiter l'élancement des éléments comprimés (espacés de 3 m entre les arches) et améliorer leur résistance au flambage.
- Des cordes en POLYTWIST de 10 mm (3/8 po), comme spécifié dans les notes du plan, ont été utilisées pour le haubanage. Certaines ont été combinées avec des sangles, d'autres haubans étaient uniquement constitués de sangles. Les observations réalisées sur le terrain permettent de croire que l'angle de certains haubans dépassait 45°, ce qui pourrait augmenter la force de tension dans ces éléments.
- La présence de blocs de béton sur la dalle intérieure suggère qu'un câblage temporaire additionnel a été mis en place, comme recommandé dans le plan de montage. En principe, la 11e arche (située à environ 30 m de l'arche de départ) aurait dû être haubanée des deux côtés. Or, aucun hauban n'a été observé sur cette arche. Les blocs ont plutôt été utilisés pour haubaner les arches numéros 7 et 18 (figure 7).

En résumé, plusieurs anomalies ou écarts d'installation du « câblage temporaire » ont été observés par rapport aux spécifications du plan de montage. De plus, ces spécifications ne présentent pas une séquence d'opérations clairement

définie, notamment en ce qui concerne l'installation du câblage en acier. Il s'agit plutôt d'une série d'instructions sans ordre chronologique précis.

Dans la prochaine section du rapport, l'efficacité du hauban ayant résisté au basculement sera analysée en considérant qu'il était entièrement constitué de cordes en polypropylène, sans combinaison avec des sangles, et sans tenir compte des anomalies d'installation (ex. : qualité des noeuds).

5.5 Analyse du contreventement temporaire des arches

Le rôle principal du contreventement temporaire (appelé « câblage temporaire » par le fabricant) est d'assurer la stabilité des arches lors du montage. Les liens continus et les haubans constituent les éléments principaux de ce système temporaire. Sa mise en place doit progresser au fur et à mesure de l'installation des arches, tout en tenant compte des tâches à réaliser simultanément, notamment l'installation du câblage en acier. Le tout doit être effectué selon une procédure de montage ordonnée, complète et sécuritaire.

Après avoir installé et haubané la première arche, la méthode d'installation des suivantes consiste à soulever chaque arche à l'aide d'une grue, puis à la positionner sur le muret de béton. Par la suite, les arches sont reliées entre elles à l'aide des liens continus, qui doivent assurer leur stabilité en transmettant à l'arche de départ les forces résultant des déformations hors plan. Ces déformations peuvent survenir sous l'effet du poids propre des arches ou en raison de problèmes de verticalité.

Ainsi, les liens continus agissent comme des vecteurs de forces, qui s'accumulent à chaque nouvelle arche installée. Ces forces peuvent également s'accroître en raison de divers facteurs, tels que l'état d'installation sur le muret de béton ou les conditions météorologiques (ex. : vitesse du vent).

En outre, les arches métalliques sont des structures légères, d'une portée d'environ 30 m (100 pi). Cette portée relativement importante présente plusieurs risques de stabilité lors du montage. En raison de leur forme arquée, les arches et leurs composantes sont principalement soumises à des charges de compression. Des déformations hors plan, telles que le flambage ou le voilement des membrures supérieures et inférieures, peuvent survenir si des mesures pour assurer leur verticalité et leur aplomb ne sont pas mises en place lors du montage, les liens continus doivent jouer ce rôle en offrant un appui latéral aux éléments contreventés.

Pour estimer la force appliquée dans ces liens, l'article 9.5 de la norme CSA-S16 – *Règles de calcul et construction des charpentes en acier* propose une méthode dite analyse simplifiée. Cette méthode stipule qu'un système de contreventement doit être dimensionné pour offrir une résistance équivalente à 2 % (0,02) de la

force de compression pondérée exercée dans l'élément contreventé, à chaque point de contreventement.

9.5 Analyse simplifiée

Les systèmes de contreventement doivent être dimensionnés de façon à offrir une résistance perpendiculaire à l'axe longitudinal de l'élément contreventé dans le plan du flambage qui soit égale à au moins 0,02 fois la force de compression pondérée qui s'exerce dans l'élément ou l'élément contreventé, à chaque point de contreventement, sauf si la résistance et la rigidité du système de contreventement sont obtenues en effectuant une analyse détaillée conforme à l'article 9.6. Toute autre force qui s'exerce sur l'élément de contreventement doit également être prise en compte. Le déplacement Δ_b ne doit pas être supérieur à Δ_o .

Figure 8 : Extrait de la norme CSA-S16 – Règles de calcul et construction des charpentes en acier

5.5.1 Calcul des forces dans liens continus

Au moment de l'accident, trois liens continus avaient été installés pour stabiliser les arches métalliques :

- Un lien continu perpendiculaire à la poutrelle 511 courbée 260-11/16 GC (poutrelle centrale au sommet de l'arche);
- Deux liens continus perpendiculaires aux poutrelles courbées 260-11/16 GC (situées à la base de l'arche).

La figure suivante montre les forces de compression internes dans les poutrelles courbées, ainsi que l'emplacement des liens continus :

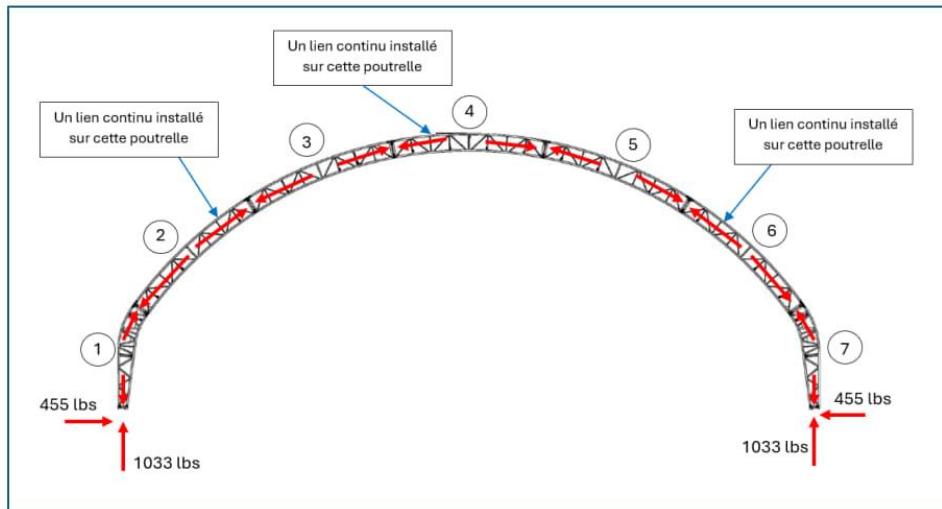


Figure 9 : Réactions aux appuis et forces de compression internes dans les poutrelles
(source CNESST)

Il est possible de supposer que les réactions aux appuis constituent une force de compression sur une arche, calculée comme suit :

$$\sqrt{455^2 + 1033^2} = 1129 \text{ lb} \approx 5000 \text{ N}$$

Selon la norme CSA-S16, 2 % de cette force, soit 100 N, peut être transmise dans les liens continus. À cette force s'ajoutent les effets liés à l'inclinaison des arches lors du montage.

Même si l'inclinaison respecte la tolérance de verticalité établie par le fabricant ($\pm 2,5^\circ$), elle génère une force supplémentaire dans les liens continus, en raison de l'excentricité du centre de gravité par rapport à la verticale.

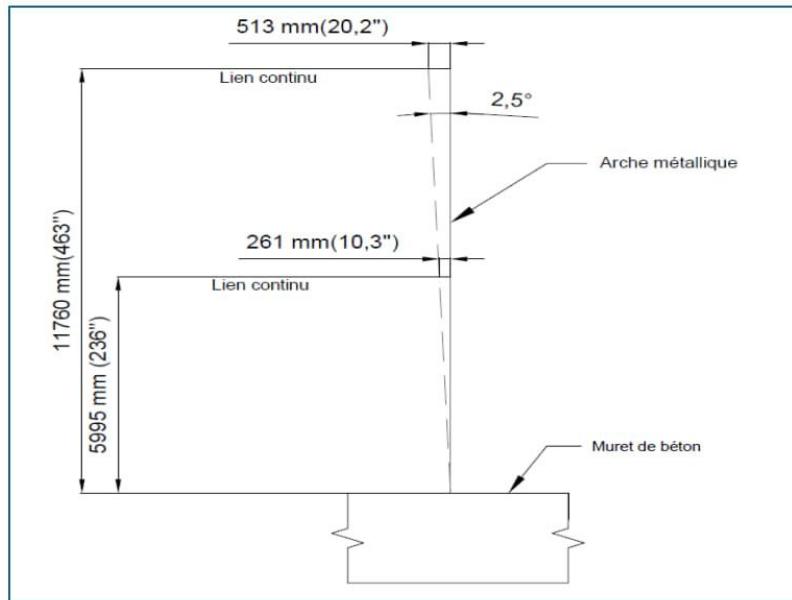


Figure 10 : Déplacement maximal d'une arche selon le critère de verticalité du fabricant.
(Source CNESST).

Cette force peut être calculée à l'aide de l'équilibre des moments à la base de l'arche :

$$P \cdot d \cdot \tan(2,5^\circ) = F \cdot d \Rightarrow F = P \cdot \tan(2,5^\circ)$$

En considérant le poids de l'arche :

$$F = 966 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot \tan(2,5^\circ) \approx 414 \text{ N}$$

Cette force s'ajoute aux 100 N calculés précédemment, ce qui donne une force totale par arche de 514 N. Pour l'ensemble des 19 arches, le cumul des forces dans les liens continus est :

$$19 \cdot (100 + 414) = 9766 \text{ N} \approx 9,7 \text{ kN}$$

Cette force aurait été transmise à travers les liens continus jusqu'à l'arche numéro 2, laquelle était haubanée par une seule corde sollicitée en traction au moment de l'accident (voir Figure 7).

5.5.2 Analyse de la performance des cordes

Le contreventement temporaire des arches lors du montage repose sur le principe selon lequel les forces qui se développent dans les liens continus sont transmises aux arches haubanées. Dans ce contexte, les forces latérales doivent être reprises par les haubans. Les ancrages ne sont pas conçus pour reprendre ces forces latérales, ni durant le montage, ni en service. Même de faibles forces latérales dans les liens continus peuvent générer des efforts importants dans les ancrages, en raison de leur excentricité par rapport aux points d'appui. Pour éviter cette situation, les haubans doivent être capables de reprendre les forces latérales tout en assurant la verticalité des arches, ou du moins en limitant leur inclinaison à l'intérieur de la tolérance établie par le fabricant.

Ces critères de performance sont directement liés aux propriétés physiques des cordes utilisées pour le haubanage. Les cordes en question sont en polypropylène, d'un diamètre de 10 mm (3/8 po). Selon les données du fabricant, leur résistance à la rupture est de 9,4 kN (2 120 lb).

Specifications			
Fibre Material	Polypropylene	Length	630'
Dimensions Dia.	3/8"	Strength	2120 lbs.
Weight	13 lbs.		

Figure 11 : Extrait du site du fabricant – Barry & Boulerice A1PJ/038 Rope, Polypropylene, 630¹ (Consulté le 30 oct. 25)

Il est possible de constater que la résistance à la rupture de la corde sollicitée en traction est presque équivalente à la force transmise par les liens continus (9,7 kN). Cette proximité pourrait avoir contribué à la rupture de la corde au moment de l'accident, entraînant le transfert des forces latérales vers les ancrages de l'arche haubanée.

Toutefois, la performance des cordes ne devrait pas être évaluée dans une situation où une seule corde est sollicitée, car cela ne respecte pas les spécifications du « câblage temporaire ». Selon ces notes, deux cordes doivent minimalement être installées sur l'arche de départ, et quatre au total lorsque le câblage temporaire est prolongé tous les 30 m.

Pour évaluer cette configuration, considérons le cas où quatre cordes similaires à celle installée auraient été sollicitées en traction. En supposant une répartition équivalente des forces, chaque corde aurait subi une charge de :

¹ <https://www.tenaquip.com/pdfs/tfc24/eng/1186.pdf?1708530922>

$$\frac{9,7 \text{ kN}}{4} = 2,4 \text{ kN}$$

Les cordes en fibre telles que le nylon ou le polypropylène présentent une élasticité importante. Une corde en polypropylène peut atteindre une élongation allant jusqu'à 9 % de sa longueur avant rupture².

La rigidité de la corde peut être estimée par la formule :

$$EA = \frac{\Delta \text{Load}}{\Delta \text{Strain}} = \frac{9,4 \text{ kN}}{0,09} = 104,4 \text{ kN}$$

La déformation sous une charge de 2,4 kN est donc :

$$\Delta \text{Strain} = \frac{2,4}{104,4} = 2,29\%$$

Selon les figures 6 et 7, la longueur approximative des cordes est :

$$\frac{44}{\cos(41^\circ) \cdot \cos(24^\circ)} = 63,81 \text{ pi} = 19,45 \text{ m} = 19450 \text{ mm}$$

L'élongation correspondante est :

$$19450 \cdot 2,29\% = 447 \text{ mm}$$

Or, selon la figure 10, l'élongation maximale admissible pour éviter le transfert des forces aux ancrages est de 261 mm. Ainsi, même avec quatre cordes, la sollicitation des ancrages serait inévitable. Dans le cas de l'accident, une force de 9,7 kN aurait pu provoquer la rupture de la corde ou, à tout le moins, une élongation proche de la limite maximale avant rupture :

$$19450 \cdot 9\% = 1750,5 \text{ mm}$$

La sollicitation des ancrages serait donc survenue bien avant l'atteinte de cette limite.

² Ropes, Rigging and Slinging Hardware. Safe practice guide IHSA

5.6 Résistance des ancrages

Comme mentionné précédemment, la résistance aux forces latérales devrait être assurée par un système de contreventement. Les ancrages des arches ne sont pas conçus pour assurer cette fonction, ni durant l'installation, ni en conditions de service. En cas de rupture ou d'élongation excessive des cordes, les forces latérales peuvent être transférées aux ancrages. Ces forces peuvent être calculées à partir de l'équilibre des forces au niveau des bases ou des points d'appui des arches (Figure 12).

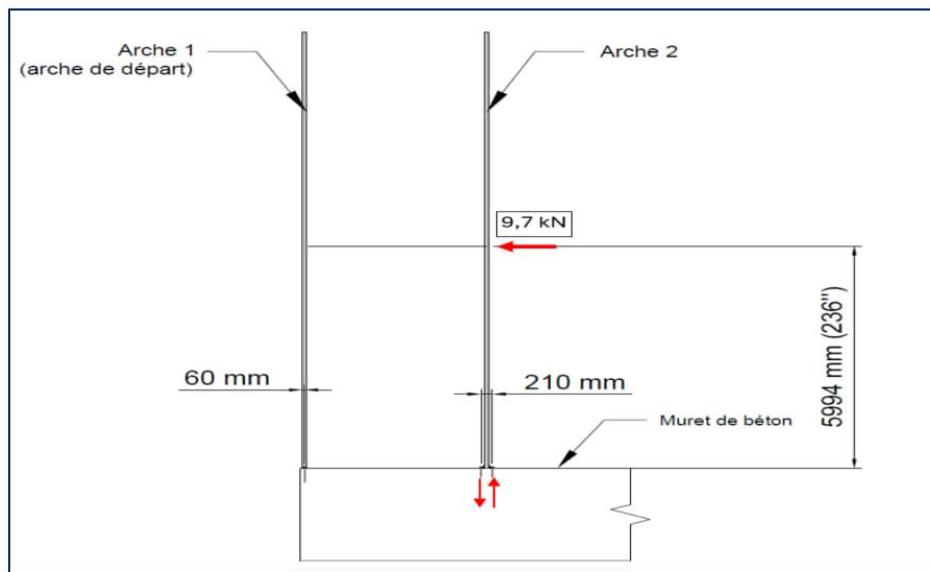


Figure 12 : Forces appliquées dans les ancrages de l'arche 2 (Source : CNESST)

Ainsi, pour l'arche numéro 2, l'équation suivante s'applique :

$$F \cdot 210 = 9,7 \cdot 5994 \Rightarrow F = 277 \text{ kN}$$

Où :

- 210 mm représente le bras de levier entre les forces dans les ancrages;
- 5994 mm est la distance entre le point d'application de la force latérale de 9,7 kN (l'emplacement du lien continu) et la base de l'arche.

Cette force serait répartie sur les deux groupes d'ancrages de chaque côté, soit :

$$\frac{277}{2} = 138,5 \text{ kN par ancrage}$$

L'arche 2, comme toutes les arches intermédiaires (2 à 18), était fixée par deux ancrages chimiques de chaque côté. Ces ancrages sont constitués de tiges Ø5/8 po x 10 po, installées après la coulée à l'aide d'un adhésif de marque Flo-Rok. Pour ce type d'ancrage, deux types de résistance sont à considérer :

- Résistance à la rupture du béton : 45,5 kN (Annexe 1)
- Résistance d'adhésion de l'ancrage chimique : 74 kN (Annexe 1)

Ces deux valeurs sont inférieures à la force de traction estimée à 138,5 kN, ce qui aurait contribué au basculement de l'arche 2.

Cependant, il faut considérer que ce basculement ne serait pas survenu avant celui de l'arche de départ (arche 1). En effet, l'arche 1 doit basculer en premier pour que l'arche 2 suive.

Les ancrages de l'arche 1 peuvent développer deux types de résistance :

- Résistance à la rupture du béton : 47,6 kN (Annexe 1)
- Résistance à la traction de l'acier : 117 kN (Annexe 1)

Selon l'équation d'équilibre des forces à la base de l'arche 1 :

$$F \cdot 60 = 9,7 \cdot 5994 \Rightarrow F = 969 \text{ kN}$$

Le mode de rupture anticipé pour les ancrages de cette arche dépend de la résistance à la traction de l'acier, puisque le sens du basculement sollicite les tiges principalement en traction (Photographie 13). Même en considérant que les quatre tiges d'ancrage aient été sollicitées selon leur résistance maximale en traction :

$$4 \cdot 117 = 468 \text{ kN}$$

Cette valeur demeure inférieure à la force appliquée (969 kN). En conséquence, le basculement de l'arche 1 était inévitable, entraînant un enchaînement du basculement des autres arches, similaire à un effet domino.

6 Conclusion

Au terme de cette analyse, les éléments suivants ont été identifiés comme facteurs ayant contribué au basculement des arches métalliques :

- Le contreventement temporaire mis en place lors du montage des arches n'était pas conforme aux notes spécifiées dans le plan de montage, notamment celles relatives au « câblage temporaire ». Malgré la présence de plusieurs cordes au moment de l'accident, une seule aurait été sollicitée en traction dans le sens du basculement. Cela équivaut à un contreventement minimal, impliquant une seule corde pour stabiliser les 19 arches installées.
- La corde ayant résisté au basculement aurait subi une rupture ou une élongation excessive, proche de sa limite maximale avant rupture. Cette situation aurait permis le transfert des forces latérales engendrées par l'instabilité des arches durant le montage. De plus, des efforts supplémentaires dus aux forces de compression dans les arches auraient accentué les forces latérales dans les liens continus, sollicitant davantage les ancrages.
- L'analyse du comportement des cordes en polypropylène sous l'effet de la traction montre qu'elles peuvent subir des élongations importantes en raison de leur élasticité. Selon les résultats obtenus, même avec l'utilisation de quatre cordes en traction, l'élongation observée ne permet pas d'assurer une verticalité adéquate des arches. Par conséquent, le transfert des forces latérales vers les ancrages devient possible, bien que ces derniers ne soient pas conçus pour résister à ce type de sollicitation, ce qui peut entraîner leur rupture.
- La rupture des ancrages des arches 1 et 2 a initié un enchaînement de ruptures similaires au niveau des autres arches, menant à l'effondrement complet de la charpente du bâtiment en dôme.

7 Références

- ASSOCIATION CANADIENNE DE NORMALISATION. Calcul des ouvrages en béton, (CSA A23.3:24).
- ASSOCIATION CANADIENNE DE NORMALISATION. Règles de calcul et construction des charpentes en acier, (CSA S16:24).
- Concrete Design Handbook - 4th Edition
- Ropes, Rigging and Slinging Hardware. Safe practice guide IHSA
- Manuel d'installation du fabricant pour MegaDomeMD 33'-40' (ARCHE DOUBLE) & MegaDomeMD 50' à 98'6".

Annexe 1

Résistance des ancrages

1. Résistance à la rupture du béton de l'ancrage en traction

Cette résistance se calcule selon l'article D.6.2 de l'annexe D de la norme CSA-A23.3 Calcul des ouvrages en béton :

D.6.2 Résistance à la rupture du béton de l'ancrage en traction

D.6.2.1

La résistance pondérée à la rupture du béton, N_{cbr} d'un ancrage unique ou N_{cbgr} d'un groupe d'ancrages, ne doit pas dépasser

a) pour un ancrage unique :

$$N_{cbr} = \left(\frac{A_{NC}}{A_{NCO}} \right) \psi_{ed,N} \psi_{c,N} \psi_{cp,N} \psi_{cm,N} N_{br} \quad \text{Équation D.3}$$

b) pour un groupe d'ancrages :

$$N_{cbgr} = \left(\frac{A_{NC}}{A_{NCO}} \right) \psi_{ec,N} \psi_{ed,N} \psi_{c,N} \psi_{cp,N} \psi_{cm,N} N_{br} \quad \text{Équation D.4}$$

Figure 13 : Article D.6.2. Image tirée de la norme CSA-A23.3 Calcul des ouvrages en béton

Dans un premier temps, l'équation D.4 sera utilisée pour calculer la résistance d'un groupe de deux ancrages tel qu'installé sur chaque côté. Pour ce faire, il faut calculer les paramètres N_{br} , A_{NC} , et A_{NCO} . Par la suite, il faut déterminer les coefficients $\varphi_{ec,N}$, $\varphi_{ed,N}$, $\varphi_{c,N}$, $\varphi_{cp,N}$ et $\varphi_{cm,N}$.

Le paramètre N_{br} qui représente la résistance pondérée à la rupture du béton d'un ancrage unique en traction dans du béton fissuré, se calcule selon l'article D.6.2.2

D.6.2.2

La résistance pondérée à la rupture du béton d'un ancrage unique en traction dans du béton fissuré, N_{br} ne doit pas dépasser

$$N_{br} = k_c \lambda_a \phi_c \sqrt{f'_c} h_{ef}^{1.5} R \quad \text{Équation D.6}$$

Figure 14 : Article D.2.2. Image tirée de la norme CSA-A23.3 Calcul des ouvrages en béton

- Ancrage coulé en place "lagstuds" 25 MM x 15" :

- $N_{br} = 10 * 0,65 * 1 * \sqrt{25} * 1 * (318)^{1,5} * 1,05 = 193,5 \text{ kN}$
- $K_c = 10 \quad (\text{Art. D.6.2.2})$
- $\lambda_a = 1 \quad (\text{Art. 8.6.5})$

- $\varphi_c = 0,65$ (Art. 8.4.2)
- $f'_c = 25 \text{ MPa}$
- $h_{ef} = (15-2,5)*25,4 = 318 \text{ mm}$ (Art. D.6.2.1 Figure D.6)
- $R = 1,05$ (Art. D.5.3(c))

Les coefficients $\varphi_{ec,N}$, $\varphi_{ed,N}$, $\varphi_{c,N}$, $\varphi_{cp,N}$ et $\varphi_{cm,N}$ sont déterminés selon les articles D.6.2.4, D.6.2.5, D.6.2.6, D.6.2.7 et D.6.2.8 comme suivant :

- $\varphi_{ec,N} = 1$ (Art. D.6.2.4)
- $\varphi_{ed,N} = 0,7 + 0,3 \frac{c_{a,min}}{1,5h_{ef}} = 0,7 + 0,3*(3/(1,5*12,5)) = 0,748$ (Art. D.6.2.5)
- $\varphi_{c,N} = 1,25$ (Art. D.6.2.6)
- $\varphi_{cp,N} = 1$ (Art. D.6.2.7)
- $\varphi_{cm,N} = 1$ (Art. D.6.2.8)
- $A_{NC} = (3,5 + 8,625 + 1,5 \times 12,5) \times (3 + 9) = 370,5 \text{ po}^2$ (Art. D.6.2.1 Figure D.7)
- $C_{a1} = 3,5 \text{ po}$, $S_1 = 8-5/8 \text{ po}$, $h_{ef} = 12,5 \text{ po}$ (Selon le plan MD-FONDATION-231737)

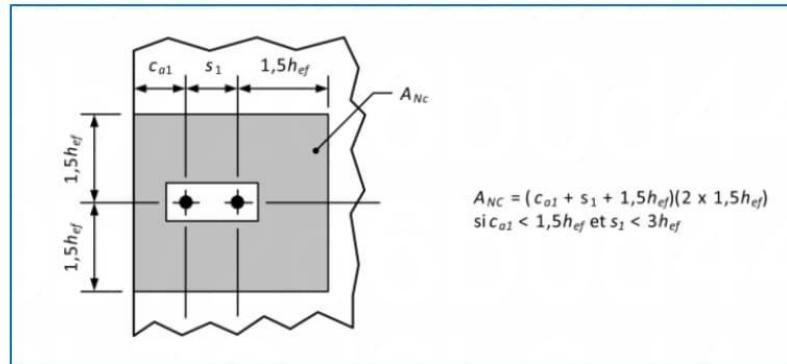


Figure 15 : Illustration de A_{NC} (extrait de la norme CSA-A23.3 *Calcul des ouvrages en béton*)

- $A_{NCo} = 9*12,5^2 = 1406,25 \text{ po}^2$ (Art. D.6.2.1 Figure D.6)

Finalement, la résistance du béton est égale à :

$$N_{cbgr} = 1*0,748*1,25*1*1*193,5*(370,5/1406,25) = 47,6 \text{ kN.}$$

- **Ancrage chimique inséré dans le béton durci Ø5/8" x 10" :**
 - $N_{br} = 7 * 0,65 * 1 * \sqrt{25} * 1 * (190,5)^{1,5} * 1,05 = 62,8 \text{ kN}$
 - $K_c = 7$ (Art. D.6.2.2)
 - $\lambda_a = 1$ (Art. 8.6.5)
 - $\varphi_c = 0,65$ (Art. 8.4.2)
 - $f'_c = 25 \text{ MPa}$
 - $h_{ef} = (10-2,5) * 25,4 = 190,5 \text{ mm}$ (Art. D.6.2.1 Figure D.6)
 - $R = 1$ (Art. D.5.3(c))
 - $\varphi_{ec,N} = 1$ (Art. D.6.2.4)
 - $\varphi_{ed,N} = 0,7 + 0,3 \frac{c_{amin}}{1,5h_{ef}} = 0,7 + 0,3 * (4,5 / (1,5 * 7,5)) = 0,82$ Équation D.11 (Art. D.6.2.5)
 - $\varphi_{c,N} = 1,4$ (Art. D.6.2.6)
 - $\varphi_{cp,N} = 1$ (Art. D.6.2.7)
 - $\varphi_{cm,N} = 1$ (Art. D.6.2.8)
 - $A_{NC} = (2 * (1,5 h_{ef}) + 4 - 1/8) * (12) = 319,5 \text{ po}^2$ (Art. D.6.2.1 Figure D.7)
 - $C_{a1} = h_{ef} = 7,5 \text{ po}$, $S_1 = 4-1/8 \text{ po}$ (Selon le plan MD-FONDATION-231737)
 - $A_{NCo} = 9 * 7,5^2 = 506,25 \text{ po}^2$ (Art. D.6.2.1 Figure D.6)

Ainsi, la résistance à la rupture du béton égale à $N_{cbgr} = 1 * 0,82 * 1,4 * 1 * 62,8 * (319,5 / 506,25) = 45,5 \text{ kN}$, pour cet ancrage

2. Résistance de l'acier en traction

Cette résistance se calcule selon l'article D.6.1.2 de la norme CSA-A23.3 :

D.6.1.2

La résistance pondérée d'un ancrage en traction, N_{sar} , ne doit pas dépasser

$$N_{sar} = A_{se,N} \varphi_c f'_{uta} R$$

Équation D.2

Figure 16 : Article D.6.1.2. Image tirée de la norme CSA-A23.3 Calcul des ouvrages en béton

- $A_{se,N} = 391 \text{ mm}^2$ pour un ancrage 25MM, Tableau 12.3 CAC Concrete Design Handbook - 4th Edition
- $\varphi_c = 0,85$ (Art. 8.4.3)
- $f'_{uta} = 414 \text{ MPa}$ Tableau 12.1 CAC Concrete Design Handbook - 4th Edition (Conforms to ASTM A307)
- $R = 0,85$ (Art. D.5.3(a))

Ce qui donne : $N_{sar} = 391 * 0,85 * 414 * 0,85 = 117 \text{ kN}$

3. Résistance d'adhérence en traction

Cette résistance est pour estimer l'adhérence de l'ancrage chimique, elle se calcule selon l'article D.6.5.1 b) de la norme CSA-A23.3 :

D.6.5 Résistance d'adhérence de l'ancrage adhérent en traction

D.6.5.1

La résistance d'adhérence pondérée en traction, N_{ar} , d'un ancrage adhérent unique ou N_{agr} , d'un groupe d'ancrages adhérents, ne doit pas dépasser

a) Pour un ancrage adhérent unique :

$$N_{ar} = \left(\frac{A_{Na}}{A_{Nao}} \right) \varphi_{ed,Na} \varphi_{cp,Na} N_{bar} \quad \text{Équation D.21}$$

b) Pour un groupe d'ancrages adhérents :

$$N_{agr} = \left(\frac{A_{Na}}{A_{Nao}} \right) \varphi_{ec,Na} \varphi_{ed,Na} \varphi_{cp,Na} N_{bar} \quad \text{Équation D.22}$$

Figure 17 : Article D.6.5. Image tirée de la norme CSA-A23.3 Calcul des ouvrages en béton

À l'image des résistances précédentes, il faut calculer les paramètres N_{bar} , A_{Na} , et A_{Nao} . Par la suite, il faut déterminer les coefficients $\varphi_{ec,Na}$, $\varphi_{ed,Na}$ et $\varphi_{cp,Na}$.

Le paramètre N_{bar} qui représente la résistance d'adhérence pondérée d'un ancrage unique en traction dans du béton fissuré, se calcule selon l'article D.6.5.2

D.6.5.2

La résistance d'adhérence pondérée d'un ancrage adhérent unique en traction dans du béton fissuré, N_{bar} ne doit pas dépasser

$$N_{bar} = \lambda_a \varphi_c \tau_{cr} \pi d_a h_{ef} R \quad \text{Équation D.25}$$

Figure 18 : Article D.6.5.2. Image tirée de la norme CSA-A23.3 Calcul des ouvrages en béton

- $N_{bar} = 1 * 0,65 * 1 * 7,95 * 1 * 3,14 * 15 * 190,5 * 1 = 46,3 \text{ kN}$
- $\lambda_a = 1$ (Art. 8.6.5)
- $\varphi_c = 0,65$ (Art. 8.4.2)
- $\tau_{cr} = 7,95 \text{ MPa}$ (Selon le manuel technique ANCRADE CHIMIQUE À INJECTION FLO-ROK® FR5MAX)
- $h_{ef} = (10-2,5) * 25,4 = 190,5 \text{ mm}$ (Art. D.6.2.1 Figure D.6)
- $R = 1$ (Art. D.5.3(c))
- $d_a = 15 \text{ mm}$
- $A_{Na} = (2C_{Na} + 4 - 1/8) * 12 = (2*6 + 4-1/8)*12 = 193,5 \text{ po}^2$ (Art. D.6.5.1 Figure D.12)
- $A_{Nao} = (C_{Na})^2 = 6^2 = 36 \text{ po}^2$ (Art. D.6.5.1 Équation D.23 et Figure D.12)

- $C_{Na} = 10 * d_o * \sqrt{\frac{\tau_{uncr}}{7,60}} = 10*15*\sqrt{\frac{7,95}{7,60}} = 153 (6'')$ (Art. D.6.5.1 Équation 24)
- $\varphi_{ec,Na} = \frac{1}{1+\frac{e_N}{c_a}} = \frac{1}{1+8,25/6} = 0,42$ (Art. D.6.5.3 et plan MD-FONDATION-231737)
- $\varphi_{ed,Na} = 0,7 + 0,3 \frac{c_{a,min}}{c_{Na}} = 0,7 + 0,3*(4,5/6) = 0,925$ Équation D.28 (Art. D.6.5.4)
- $\varphi_{cp,Na} = \frac{c_{a,min}}{c_{ac}} = \frac{4,5}{6} = 0,75$ (Art. D.6.5.5)

Ce qui donne finalement : $N_{agr} = (193,5/36)*1*0,925*0,75*0,42*46,3 = 74 \text{ kN}$.

Annexe 2

Procédure de montage

12. ANNEXE A

Montage étape par étape

OP.#	Activité	Étape #	Description
1	Fondation	1	Se référer au plan GD-FONDATION
2	Base d'arche plan MD-FONDATION	1	Fixer les bases
3	Assemblage des composantes au sol plan GD-ARCHE	1 2 3 4	-Déposer les piles selon le plan prévu à la portée de la grue -Placer les sections d'arches à l'extérieur des fondations -Assembler les sections -Empiler 5 de haut maximum
4	Blocs de béton plan MD-FONDATION page 2	1 2	-Placer les blocs -Installer ancrages et plaques
5	Positionnement 1 ^{ère} arche plan GD-ERECTION	1 2 3 4	-Vérifier les points d'attache, plan GD-ARCHE -A l'aide du palonnier, lever et aligner le pied d'arche avec les bases -Guider les pieds, insérer dans les bases et boulonner. -Attacher câbles temporaires à l'aide des tire-forts, ajuster la verticalité
6	Positionnement 2 ^{ème} arche plan GD-ERECTION	1 2 3 4	-Suivre OP. #5, étapes 1, 2, 3 -Installer 2 rangées de longerons et diagonales de chaque côté entre 1 ^{ère} et 2 ^{ème} arche -Répéter étape #2 avec longerons en porte à faux -Installer câbles entre 1 ^{ère} et 2 ^{ème} et fondation, détails B, G, J
7	Positionnement 3 ^{ème} arche à la 11 ^{ème}	1 2 3	-Suivre OP #5 étapes 1, 2, 3 -Suivre OP #6 étape 3 -Suivre OP #6 étape 4
8a	Positionnement 11 ^{ème} arche	1 2	-Suivre OP. #5 étapes 1, 2, 3, 4 -Suivre OP. #6 étape 4
8b	Structure plan GD-ERECTION	1 2 3	-Installer les rangées de longerons et diagonales restantes premier 100' -Installer câbles de contreventement -Ne pas serrer les serre-câbles 1N9006 à l'arche
9	Positionnement 12 ^{ème} à la 20 ^{ème} arche	1 2 3	-Suivre OP. #5 étapes 1, 2, 3 -Suivre OP. #6 étape 3 -Suivre OP. #6 étape 4

Figure 19 : Image tirée l'annexe A du manuel d'installation du fabricant pour MegaDomeMD 33'-40' (ARCHE DOUBLE) & MegaDomeMD 50' à 98'6"

Liste des figures:

Figure 1 : Image modifiée à partir du plan GD-PRESENTATION-231737	12
Figure 2 : Image tirée du plan MD-FONDATION-231737	13
Figure 3 : Image tirée du dessin GD-ARCHE-231737	14
Figure 4 : Détail du contreventement 25 mm (Ø1) du lien continu sur une arche. Image tirée du dessin GD-STRUCTURE-231737 1/2.	15
Figure 5 : Contreventement par câblage en acier. Image tirée du dessin GD-STRUCTURE-231737 2/2	15
Figure 6 : « Câblage temporaire » tel que réalisé au moment de l'accident (vue en plan) (source CNESST)	17
Figure 7 : "Câblage temporaire" tel que réalisé au moment de l'accident. (Vue élévation) (source CNESST)	17
Figure 8 : Extrait de la norme CSA-S16 – Règles de calcul et construction des charpentes en acier	20
Figure 9 : Réactions aux appuis et forces de compression internes dans les poutrelles (source CNESST)	21
Figure 10 : Déplacement maximal d'une arche selon le critère de verticalité du fabricant. (Source CNESST)	22
Figure 11 : Extrait du site du fabricant – Barry & Boulérice A1PJ/038 Rope, Polypropylene, 630' (Consulté le 30 oct. 25)	23
Figure 12 : Forces appliquées dans les ancrages de l'arche 2 (Source : CNESST)	25
Figure 13 : Article D.6.2. Image tirée de la norme CSA-A23.3 Calcul des ouvrages en béton.....	28
Figure 14 : Article D.2.2. Image tirée de la norme CSA-A23.3 Calcul des ouvrages en béton.....	28
Figure 15 : Illustration de ANC (extrait de la norme CSA-A23.3 <i>Calcul des ouvrages en béton</i>) .	29
Figure 16 : Article D.6.1.2. Image tirée de la norme CSA-A23.3 Calcul des ouvrages en béton .	30
Figure 17 : Article D.6.5. Image tirée de la norme CSA-A23.3 Calcul des ouvrages en béton.....	31
Figure 18 : Article D.6.5.2. Image tirée de la norme CSA-A23.3 Calcul des ouvrages en béton .	31
Figure 19 : Image tirée l'annexe A du manuel d'installation du fabricant pour MegaDomeMD 33'-40' (ARCHE DOUBLE) & MegaDomeMD 50' à 98'6"	32

Liste des photographies:

Photographie 1 : : Vue aérienne de l'effondrement par effet "domino" des arches métalliques. (Source CNESST)	5
Photographie 2 : appareils de levage de personnes présents sur les lieux de l'accident. (Source CNESST)	6

Photographie 3 : Une corde jaune attachée à une arche métallique. (Source CNESST).....	6
Photographie 4 : Une corde jaune attachée à une arche métallique. (Source CNESST).....	7
Photographie 5 : Une corde reliée à un sangle. (Source CNESST)	7
Photographie 6 : Une corde reliée à un sangle. (Source CNESST)	7
Photographie 7 : Spécifications des cordes utilisées pour haubaner les arches métalliques (Source CNESST)	8
Photographie 8 : Une cornière d'ancrage reliée à un "tirefort" manuel à chaîne. (Source CNESST)	8
Photographie 9 : Photographie 9 : Un hauban composé par un sangle reliant une arche à un tendeur et un point d'ancrage sur le muret de béton. (Source CNESST)	9
Photographie 10 : Éclatement du béton au niveau de l'ancrage d'une arche. (Source CNESST) .	9
Photographie 11 : Arrachement des tiges d'ancrage d'une arche intermédiaire. (Source CNESST)	10
Photographie 12 : Déformation excessive (pliage) d'une tige d'ancrage d'une arche intermédiaire. (Source CNESST)	10
Photographie 13 : Arrachement d'une tige d'ancrage et fracturation d'un autre en traction (Source CNESST)	11

ANNEXE C - Références bibliographiques

QUÉBEC. *Code de sécurité pour les travaux de construction, RLRQ, chapitre S-2.1, r.4*, à jour au 5 juin 2025, [En ligne], 2024. [S-2.1, r. 4 - Code de sécurité pour les travaux de construction \(gouv.qc.ca\)](https://s21.gouv.qc.ca) (consulté le 2 juillet 2025).

QUÉBEC. *Loi sur la santé et la sécurité du travail, RLRQ, chapitre S-2.1*, à jour au 5 juin 2025, [En ligne], 2024. [S-2.1 - Loi sur la santé et la sécurité du travail \(gouv.qc.ca\)](https://s21.gouv.qc.ca) (consulté le 2 juillet 2025).