

**RAPPORT D'ENQUÊTE**

**Accident ayant causé la mort d'un travailleur de l'entreprise  
Multi-Services Blindés inc., d'un travailleur de  
Les Entreprises CRC inc. et ayant causé des blessures à  
plusieurs autres travailleurs, survenu le 26 octobre 2021  
chez Domtar inc. à Windsor**

**Version dépersonnalisée**

**Service de la prévention-inspection - Estrie**

**Inspectrice :**

\_\_\_\_\_  
**Marilyn Boulianne,  
Inspectrice**

**Inspecteur :**

\_\_\_\_\_  
**Sylvain Roy, ing.**

**Date du rapport : 28 septembre 2022**

**Rapport distribué à :**

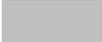
- Monsieur Sylvain Bricault, directeur général, Domtar inc. Windsor
- Monsieur A [REDACTED] Domtar inc. Windsor
- Monsieur Nicolas Legault, directeur régional, AlumaSafway inc.
- Monsieur B [REDACTED], AlumaSafway inc.
- Monsieur David Marchand, président, Services d'entretien Piervan inc.
- Monsieur C [REDACTED], Services d'entretien Piervan inc.
- Monsieur Jean-Philippe Therrien, président, Métafab Therrien inc.
- Monsieur Émile Cardin, président, Mécanique industrielle CRD
- Monsieur Éric Petitclerc, président, Multi-Services Blindés inc.
- Monsieur Keven Petitclerc-Desroches, président, Les Entreprises CRC inc.
- Docteur Gilles Sainton, coroner
- Docteure Isabelle Samson, directrice de la Santé publique de l'Estrie

**TABLE DES MATIÈRES**

<b><u>1</u></b>	<b><u>RÉSUMÉ DU RAPPORT</u></b>	<b><u>4</u></b>
<b><u>2</u></b>	<b><u>ORGANISATION DU TRAVAIL</u></b>	<b><u>6</u></b>
2.1	STRUCTURE GÉNÉRALE LORS DES TRAVAUX DANS LE CADRE DE L'ARRÊT PROLONGÉ POUR ENTRETIEN	6
2.2	ORGANISATION DE LA SANTÉ ET DE LA SÉCURITÉ DU TRAVAIL	9
2.2.1	MÉCANISMES DE PARTICIPATION	9
2.2.2	GESTION DE LA SANTÉ ET DE LA SÉCURITÉ	11
<b><u>3</u></b>	<b><u>DESCRIPTION DU TRAVAIL</u></b>	<b><u>13</u></b>
3.1	DESCRIPTION DU LIEU DE TRAVAIL	13
3.2	DESCRIPTION SOMMAIRE DE L'ÉCHAFAUDAGE	15
3.3	DESCRIPTION DU TRAVAIL À EFFECTUER	18
<b><u>4</u></b>	<b><u>ACCIDENT : FAITS ET ANALYSE</u></b>	<b><u>20</u></b>
4.1	CHRONOLOGIE DE L'ACCIDENT	20
4.2	CONSTATATIONS ET INFORMATIONS RECUEILLIES	22
4.2.1	ÉLÉMENTS RELATIFS AUX TRAVAILLEURS DÉCÉDÉS	22
4.2.2	RAPPORT D'EXPERTISE	22
4.2.3	PLAN DE CONCEPTION DE L'ÉCHAFAUDAGE DESSINÉ PAR L'INGÉNIEUR	22
4.3	ÉNONCÉS ET ANALYSE DES CAUSES	29
4.3.1	ÉNONCÉ DE LA PREMIÈRE CAUSE.	29
4.3.2	ÉNONCÉ DE LA DEUXIÈME CAUSE.	30
<b><u>5</u></b>	<b><u>CONCLUSION</u></b>	<b><u>31</u></b>
5.1	CAUSES DE L'ACCIDENT	31
5.2	SUIVIS DE L'ENQUÊTE	31

---

**ANNEXES**

<b>ANNEXE A :</b>	<b>Liste des accidentés</b>	<b>32</b>
<b>ANNEXE B :</b>	<b>Liste des personnes interrogées</b>	<b>34</b>
<b>ANNEXE C :</b>	<b>Plan échafaudage d'accès Projet lessiveur (échafaudage partiel)</b>	<b>35</b>
<b>ANNEXE D :</b>		<b>36</b>
<b>ANNEXE E :</b>	<b>Rapport d'expertise</b>	<b>37</b>
<b>ANNEXE F :</b>	<b>Références bibliographiques</b>	<b>38</b>

**TABLE DES FIGURES**

<b>Figure 1 :</b>	Niveaux supérieurs après effondrement et niveaux effondrés sous les niveaux supérieurs	4
<b>Figure 2 :</b>	Organisation lors des travaux	7
<b>Figure 3 :</b>	Partie extérieure du lessiveur	14
<b>Figure 4 :</b>	Structure centrale à l'intérieur du lessiveur et tamis	15
<b>Figure 5 :</b>	Plan de l'échafaudage installé dans le lessiveur	16
<b>Figure 6 :</b>	Plancher en saillie vue de dessus	17
<b>Figure 7 :</b>	Positionnement approximatif des travailleurs au moment de l'effondrement	21
<b>Figure 8 :</b>	Tableau des charges appliquées aux échafaudages	25
<b>Figure 9 :</b>	Niveaux de plancher en saillie avec et sans contreventement	27
<b>Figure 10 :</b>	Flambage d'un montant à rosette	28

## DÉFINITIONS :

**Analyse aux contraintes admissibles (contraintes en service) :** la conception aux contraintes admissibles est une méthode de conception utilisée en ingénierie structurelle. On dimensionne une structure en calculant les contraintes, dans le domaine élastique des matériaux, provoquées par les charges et surcharges maximales prévues et en comparant avec les contraintes admissibles des matériaux. La contrainte admissible d'un matériau est égale à sa contrainte de rupture divisée par un facteur de sécurité.

**Analyse aux états limites :** méthode de conception utilisée en ingénierie structurelle. Un état limite est une condition d'une structure au-delà de laquelle elle ne remplit plus les critères de conception pertinents. Les états limites qui mettent en cause la sécurité sont appelés états limites ultimes. Il s'agit entre autres de la limite de capacité portante, de la rupture, du renversement, du glissement, de la stabilité et de fortes déformations.

**Charge admissible :** charge que peut supporter une membrure ou une structure et à laquelle elle peut résister en service. *Réf : CSA S269.2-16 Échafaudage d'accès pour les travaux de construction.*

**Charge morte :** masse morte de toutes les pièces d'un échafaudage. *Réf : Norme CSA Z797-18 Règles d'utilisation des échafaudages d'accès*

**Charge totale :** somme des charges mortes et vives.

**Charge ultime :** charge qui entraîne la défaillance d'une membrure ou d'une structure. *Réf : CSA S269.2-16 Échafaudage d'accès pour les travaux de construction.*

**Charge vive :** poids total des travailleurs, de l'équipement, des matériaux, ainsi que de toutes les charges (p. ex., charges dues au vent ou à la neige) autres que la charge morte. *Réf : Norme CSA Z797-18 Règles d'utilisation des échafaudages d'accès*

**Contreventement :** élément d'un échafaudage qui en assure la stabilité en empêchant tout mouvement latéral. *Réf : Norme CSA Z797-18 Règles d'utilisation des échafaudages d'accès*

**Échafaudage modulaire (ou à rosettes) :** échafaudage dont les montants sont fabriqués de manière à présenter des points de raccordement espacés à intervalles réguliers qui peuvent accueillir des boulins, des longerons et des contreventements ayant des extrémités spécialement formées. *Réf : Norme CSA Z797-18 Règles d'utilisation des échafaudages d'accès.*

**Facteur de sécurité :** rapport entre la charge ultime et la charge admissible. C'est le facteur utilisé dans la méthode d'analyse aux contraintes admissibles. C'est une mesure de la fiabilité d'une conception puisqu'elle exprime à quel point un système est plus solide qu'il ne doit l'être pour une charge prévue.

**Flambage :** tendance qu'à un matériau soumis à une force de compression longitudinale à fléchir ou à se déformer dans une direction perpendiculaire à la force appliquée.

**Membrure d'échafaudage** : forte pièce en bois ou en métal, servant de point d'appui à une charpente ou à un assemblage de pièces ajustées. *Réf : Petit Larousse illustré*

**Plancher en saillie** : planchers qui sont installés à l'extérieur des quatre montants de l'échafaudage.

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

Le 26 octobre 2021, vers 1 h 30, lors d'un arrêt prolongé (*shutdown*) visant à permettre la réalisation de travaux d'entretien dans le lessiveur chez Domtar à Windsor, un échafaudage à rosettes de 16 niveaux installé à l'intérieur du lessiveur pour les besoins des travaux s'effondre.

**Conséquences**

Un journalier soudeur et un homme à tout faire sont écrasés par le poids des composantes de l'échafaudage à rosettes et décèdent. Plusieurs autres travailleurs sont blessés.

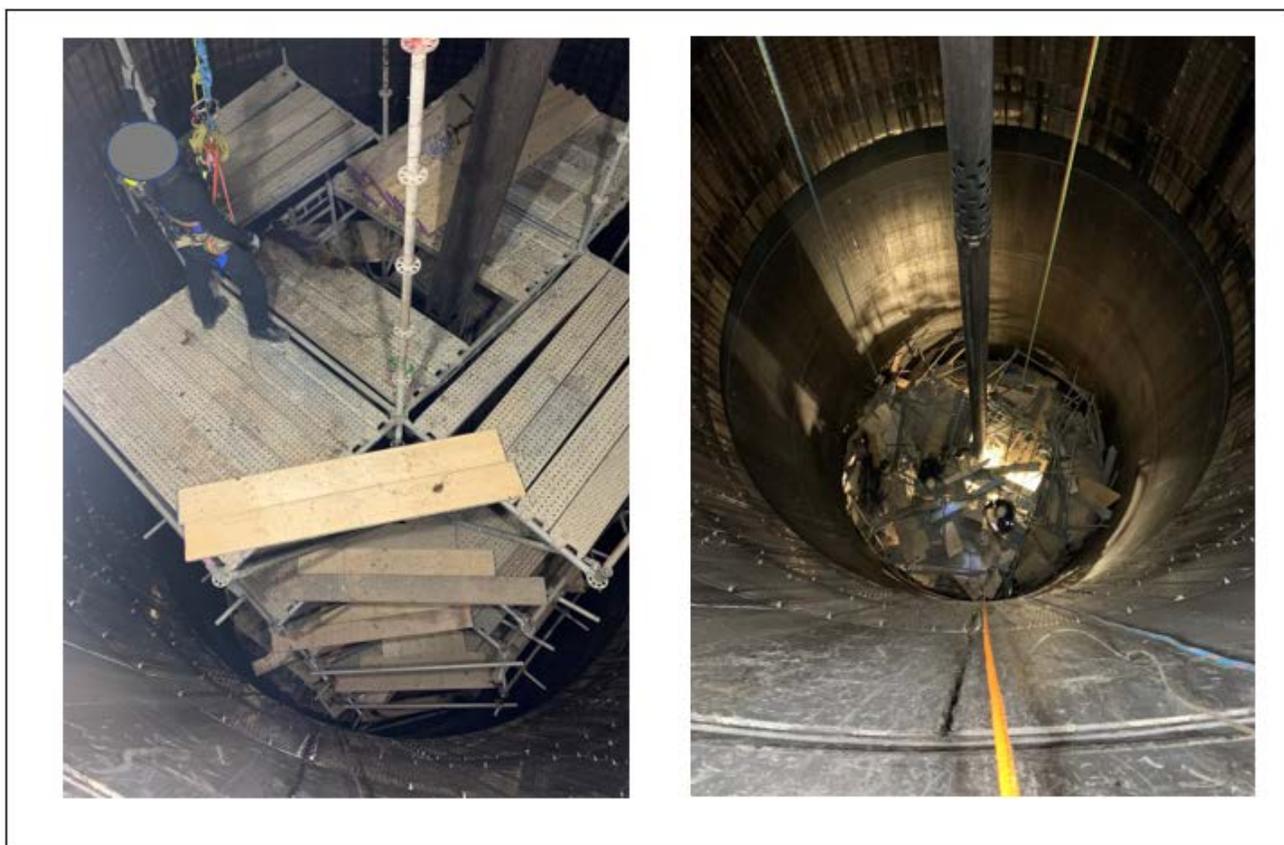


Figure 1 – Niveaux supérieurs après effondrement et niveaux effondrés sous les niveaux supérieurs

Source : Service d'incendie de Sherbrooke

**Abrégé des causes**

- La conception de l'échafaudage comporte des lacunes quant au facteur de sécurité utilisé, à la charge morte de l'échafaudage sous-estimée et à l'absence de contreventement des diagonales qui soutiennent le plancher en saillie du niveau sept.
- La charge ultime d'un des montants à rosettes est atteinte ce qui provoque sa rupture et l'effondrement de l'échafaudage.

**Mesures correctives**

Le 4 novembre 2021, dans le rapport d'intervention RAP1365902, la CNESST ordonne la suspension des travaux d'entretien prolongé du lessiveur.

Afin d'éliminer le danger d'effondrement de l'échafaudage dans le lessiveur, la CNESST exige l'élaboration d'une méthode de travail sécuritaire. Celle-ci devant inclure notamment :

- Un plan d'assemblage de l'échafaudage signé et scellé par un ingénieur et l'inspection de l'échafaudage avant d'autoriser son utilisation;
- La procédure de travail en espace clos;
- La procédure de cadenassage;
- La procédure de sauvetage;
- Une liste décrivant la séquence des travaux.

Domtar inc. de Windsor s'est conformée aux exigences.

*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 lors des travaux dans le cadre de l'arrêt prolongé pour entretien**

Huit entreprises sont impliquées dans la présente enquête.

Domtar inc. de Windsor est le donneur d'ouvrage. À ce titre, l'entreprise embauche AlumaSafway inc. et Services d'entretien Piervan inc.

AlumaSafway inc. agit comme fournisseur et installateur d'équipement d'échafaudage. Celle-ci a octroyé un contrat à Boileau & Associés pour élaborer le plan de conception de l'échafaudage à rosettes utilisé dans le lessiveur ainsi que pour réaliser les inspections de l'état de l'échafaudage avant d'autoriser son utilisation par Domtar inc.

Services d'entretien Piervan inc. est responsable des travaux d'entretien et de soudure sur le lessiveur. À son tour, l'entreprise engage des sous-traitants pour exécuter des travaux spécifiques, dont Métafab Therrien inc., Mécanique industrielle CRD et Multi-Services Blindés inc. Finalement, Multi-Services Blindés inc. embauche à son tour un travailleur de Les entreprises CRC inc. pour compléter l'équipe.

Lors des travaux d'entretien, un contremaître de Métafab Therrien est responsable des travailleurs de Mécanique industrielle CRD, de Multi-Services Blindés inc. et de Les Entreprises CRC inc. (voir la figure 2).

Structure de l'organisation lors des travaux d'entretien prolongés du lessiveur.

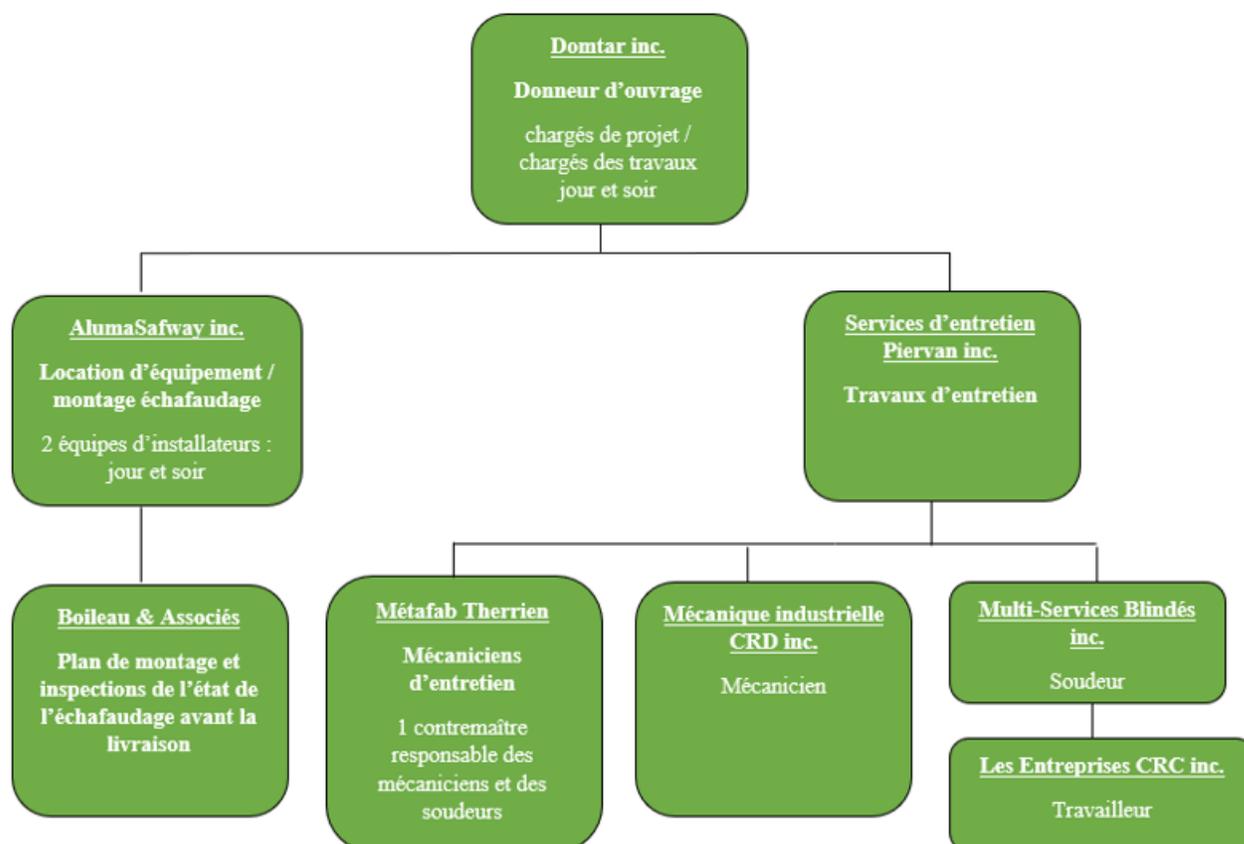


Fig. 2 - Organisation lors des travaux

Source : CNESST

### **Domtar inc.**

L'entreprise Domtar inc. (ci-après appelée Domtar), située au 609, 12<sup>e</sup> Rang à Windsor, se spécialise dans la fabrication et la distribution de pâte et de papier. L'entreprise fait partie du secteur d'activité économique *Industrie du papier et des activités diverses*.

À l'établissement de Windsor, Domtar emploie environ 850 travailleurs syndiqués. Les opérations se déroulent 24 heures par jour, 7 jours par semaine.

### **AlumaSafway inc.**

L'entreprise AlumaSafway inc. (ci-après appelée Aluma), située au 2850, Montée Saint-François à Laval, se spécialise notamment dans la location, le montage et le démontage d'échafaudage. L'entreprise fait partie du secteur d'activité économique *Bâtiment et travaux publics*.

Aluma emploie de 300 à 500 travailleurs syndiqués. Les opérations se déroulent 24 heures par jour, 7 jours par semaine.

**Boileau & Associés**

Il s'agit d'un bureau d'ingénieurs-conseils, situé au 550, boulevard Taschereau à La Prairie.

**Services d'entretien Piervan inc.**

L'entreprise Services d'entretien Piervan inc. (ci-après appelée Piervan), située au 545, Route 249 Nord à Windsor, se spécialise notamment dans l'entretien, la mécanique industrielle et les services spécialisés comme la soudure haute pression. L'entreprise appartient au secteur d'activité économique *Bâtiment et travaux publics*.

Piervan emploie environ 68 travailleurs non syndiqués. L'horaire de travail est déterminé par les clients chez lesquels les travailleurs sont assignés.

**Métafab Therrien**

L'entreprise Métafab Therrien (ci-après appelée Métafab), située au 10, rue Nancy à Trois-Rivières, se spécialise dans la maintenance et la mécanique industrielle. L'entreprise appartient au secteur d'activité économique *Bâtiment et travaux publics*.

Métafab emploie environ 43 travailleurs non syndiqués. L'horaire de travail est déterminé par les clients chez lesquels les travailleurs sont assignés.

**Mécanique industrielle CRD**

L'entreprise Mécanique industrielle CRD (ci-après appelée Mécanique CRD), située au 52, rue Leblanc à St-François-du-Lac, se spécialise dans la location de main-d'œuvre pour d'autres entreprises de maintenance industrielle. L'entreprise appartient au secteur d'activité économique *Autres services commerciaux et personnels*.

Mécanique CRD emploie de 15 à 20 travailleurs non syndiqués. L'horaire de travail est déterminé par les clients chez lesquels les travailleurs sont assignés.

**Multi-Services Blindés inc.**

L'entreprise Multi-Services Blindés inc. (ci-après appelée Multi-Service Blindés), située au 1494, Route 138 à Donnacona, se spécialise dans la maintenance, l'entretien et la réparation d'équipements industriels divers. L'entreprise appartient au secteur d'activité économique *Bâtiment et travaux publics*.

Multiservices Blindés emploie environ 12 travailleurs non syndiqués. L'horaire de travail est déterminé par les clients chez lesquels les travailleurs sont assignés.

## **Les Entreprises CRC inc.**

Les Entreprises CRC inc. (ci-après appelé CRC), située au 17, rue Birch à Shannon, se spécialise dans le déneigement des toits de remorques du secteur des transports ainsi que dans l'aménagement paysager avec sa division Les Authentiques paysagistes et dans l'abattage d'arbres avec sa division Services d'arbres GKP. Elles offrent également leurs services pour effectuer de l'entretien de bâtiments. L'entreprise appartient au secteur d'activité économique *Autres services commerciaux et personnels*.

CRC emploie environ 20 travailleurs non syndiqués à l'année. Ce nombre monte jusqu'à 70 travailleurs au plus fort de leur saison de travail. L'horaire de travail pour les travaux d'entretien de bâtiment est déterminé par les clients chez lesquels les travailleurs sont assignés.

## **2.2 Organisation de la santé et de la sécurité du travail**

### **2.2.1 Mécanismes de participation**

#### **Lors de l'arrêt prolongé pour les travaux d'entretien**

Dans le but d'assurer une continuité dans les travaux, ceux-ci se poursuivent 24 heures sur 24. Des chargés de travaux de Domtar sont présents sur chaque quart de travail de 12 heures et ils se rencontrent au changement de quart de travail pour faire état de la situation au chargé de travaux qui prend la relève.

Après une rencontre entre les chargés de travaux des deux quarts de travail, le chargé de travaux du quart de travail en cours et des représentants de toutes les entreprises impliquées dans l'arrêt prolongé pour les travaux d'entretien du lessiveur se rencontrent dans un bâtiment temporaire pour que le transfert d'information puisse se faire d'un quart de travail à l'autre. En plus du travail à faire, prévu pour la durée du quart de travail, divers sujets sont abordés lors de ces rencontres, notamment, la santé et la sécurité du travail. Par exemple, une de ces rencontres peut être utilisée pour compléter la fiche Analyse sécuritaire de tâches associées au travail à faire et aux risques associés dans le lessiveur. Cette dernière est associée à un lieu et permet d'identifier les risques présents.

De plus, chaque travailleur appelé à exercer son métier chez Domtar doit recevoir certaines informations transmises par Domtar concernant la sécurité sur les sites, les droits et devoirs des travailleurs, les règles et moyens de prévention appliqués lors des entrées en espace clos, quoi faire et comment porter l'équipement de protection respiratoire en cas de fuite de produits dangereux, les différents types d'alarmes, etc. Les travailleurs rencontrés confirment avoir reçu ces informations.

#### **Domtar**

Un comité de santé et sécurité paritaire se réunit à intervalle régulier. De plus, des représentants à la prévention sont présents à tous les quarts de travail pour assurer leur fonction.

#### **Aluma**

Il y a un responsable d'Aluma par site qui a notamment comme responsabilité de s'assurer de connaître les procédures santé et sécurité du client. Il doit par la suite transmettre les informations aux travailleurs.

Il y a également chez Aluma une procédure d'arrêt de travail obligatoire que les travailleurs doivent appliquer quand une situation dangereuse se présente. Par la suite, un processus s'enclenche pour corriger la situation dangereuse.

**Piervan**

Un comité de santé et sécurité est constitué, mais non actif. Un travailleur assure le poste de préventionniste et a pour fonction d'assurer une présence sur les lieux de travail et développer une culture santé sécurité auprès de ses collègues.

Des pauses sécurité hebdomadaires sont aussi tenues notamment, pour donner des explications aux travailleurs concernant divers sujets tels que la tenue des lieux, les travaux en hauteur, les échafaudages, les espaces clos, etc. Selon le programme de prévention, un procès-verbal de ces pauses sécurités est rédigé et conservé par l'employeur.

**Métafab**

Un comité de santé et sécurité se réunit, mais il ne peut être considéré paritaire puisqu'il n'est pas composé du même nombre de représentants patronaux que de représentants des travailleurs.

**Mécanique CRD**

Il y a absence d'un comité de santé et sécurité et d'un représentant des travailleurs. L'employeur assure lui-même une présence sur les lieux de travail et veille avec les personnes en place chez les clients à l'application des consignes en matière de santé et sécurité du travail.

Les travailleurs sont encouragés à signaler verbalement à leur employeur toute situation qu'ils jugent dangereuse.

**Multi-Services Blindés**

Il y a absence d'un comité de santé et sécurité et d'un représentant des travailleurs. L'employeur demande aux travailleurs de signifier verbalement à une personne responsable toute situation dangereuse.

**CRC**

Il y a absence d'un comité de santé et sécurité et d'un représentant des travailleurs.

## 2.2.2 Gestion de la santé et de la sécurité

### Domtar

La gestion de la santé et de la sécurité chez Domtar, s'appuie sur un programme de prévention. De plus, il y a un manuel de référence en santé et sécurité du travail. On y retrouve notamment des programmes concernant le travail en espaces clos et le cadenassage. On y traite des risques associés et des moyens pour contrôler ces risques.

Pour encadrer les travaux lors de l'arrêt prolongé pour l'entretien, la séquence des travaux est prévue par un ingénieur incluant du temps pour effectuer le cadenassage, l'application de la procédure d'intervention en espace clos, les inspections de l'échafaudage par Aluma ainsi que celle faite par les utilisateurs, etc.

### Aluma

Aluma utilise un programme de prévention pour assurer la gestion de la santé et de la sécurité du travail de l'entreprise. Différents moyens de prévention y sont consignés et il est demandé aux travailleurs de les appliquer. De plus, ceux-ci sont tenus de respecter ce qui est en vigueur au niveau de la santé et de la sécurité du travail chez leurs différents clients où ils sont assignés.

Aluma utilise comme moyen de contrôle pour assurer la sécurité des utilisateurs de l'échafaudage, une fois que le montage est complété, des inspections effectuées par un ingénieur. Celui-ci valide que l'installation est conforme au plan de montage du projet et valide l'état de l'échafaudage (sécuritaire – présentant un risque éventuel ou inhabituel – dangereux). Une fois que l'état de l'échafaudage est jugé sécuritaire, la personne responsable du projet, installe l'étiquette qui confirme que l'état de l'échafaudage est sécuritaire et informe le client qu'il peut l'utiliser.

### Piervan

Un programme de prévention encadre la gestion de la santé et de la sécurité du travail de l'entreprise. Des politiques et procédures concernant des thèmes comme le travail en espaces clos, le travail en hauteur, le travail à chaud y sont présentés ainsi que des moyens de prévention associés à ces risques. Ces politiques et procédures sont développées par une [REDACTED]. Cette personne est également responsable du programme de prévention.

Des fiches *Analyse sécuritaire de tâches* sont complétées par les travailleurs avant de débiter les travaux chez un client. Il est obligatoire de le faire pour prendre connaissance des éléments présents sur les lieux de travail qui nécessitent une attention particulière en raison des risques qu'ils peuvent présenter.

### Métafab

L'entreprise utilise un programme de prévention pour encadrer la gestion de la santé et de la sécurité du travail. Une section de ce programme est consacrée à l'utilisation des échafaudages installés par des compagnies spécialisées ou par les donneurs d'ouvrage. Les travailleurs doivent s'assurer, en consultant l'étiquette apposée sur l'échafaudage pour confirmer si un ingénieur a statué sur l'état de l'échafaudage s'il est sécuritaire ou non. On décrit également en quoi consiste le travail en espace clos et que seuls les travailleurs ayant obtenu la formation sur le sujet, peuvent accomplir ce genre de travaux.

**Mécanique CRD**

Il y a absence de programme de prévention chez cet employeur.

**Multi-Services Blindés**

L'employeur a rédigé un document énumérant les différents types de risques que l'on peut rencontrer au travail. Ce document est accessible aux travailleurs, mais il ne fait aucune mention des moyens de prévention à utiliser pour éliminer ou contrôler les risques.

L'employeur mentionne que dans la pratique, ses travailleurs accomplissent leur tâche exclusivement chez des clients et qu'ils sont tenus d'appliquer le programme de prévention de ceux-ci. L'employeur prévoit du temps pour que ses travailleurs puissent prendre connaissance du travail à faire, des risques associés et au besoin suivre des formations spécifiques offertes par leurs clients.

**CRC**

L'entreprise utilise les services [REDACTED] et avec l'aide de celle-ci, un guide santé sécurité est rédigé. Ce guide contient notamment des politiques sur la santé et la sécurité ainsi que sur le harcèlement. Il y a également des consignes de sécurité générales à respecter lors des travaux de déneigement de toits de remorques ou encore de toits de bâtiments. Il y a absence d'identification des risques, des moyens de prévention et des mesures de contrôle spécifiques liés à l'entretien de bâtiment.

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

Le lessiveur qui se trouve dans un bâtiment de 10 étages, fait partie du département 411 de la pulperie de l'usine Domtar. Il s'agit d'un équipement sous pression qui a l'apparence d'un silo, dans lequel des copeaux de bois et certains produits chimiques sont mélangés pour former la pâte à papier (voir la figure 3). Au fond du lessiveur se trouve un racloir rotatif avec deux lames pour mélanger et une structure en forme de cône au centre qui permet de distribuer le mélange vers les parois. On y trouve également un tube central supporté par le haut, qui se dresse du deuxième étage du bâtiment jusqu'au dixième étage (voir figure 4).

Le lessiveur est un espace clos d'au moins 39 m (128 pi) de haut et un diamètre intérieur qui varie de 6.2 m (20 pi et 3 po) à 7.2 m (23.5 pi) avec des accès possibles par des trous d'homme situés aux étages deux, cinq et neuf du bâtiment qu'il occupe.



*Fig. 3 - Partie extérieure du lessiveur*

Source : CNESST

À l'intérieur du lessiveur sur certaines sections de parois, se trouvent des tamis qui permettent entre autres d'injecter les produits chimiques (voir la figure 4). Ces tamis sont en fait des portes sur charnières qui sont boulonnées étant donné qu'elles sont dans un équipement sous pression. Il y a également, des soudures circonférentielles qui joignent les différentes parties du lessiveur.

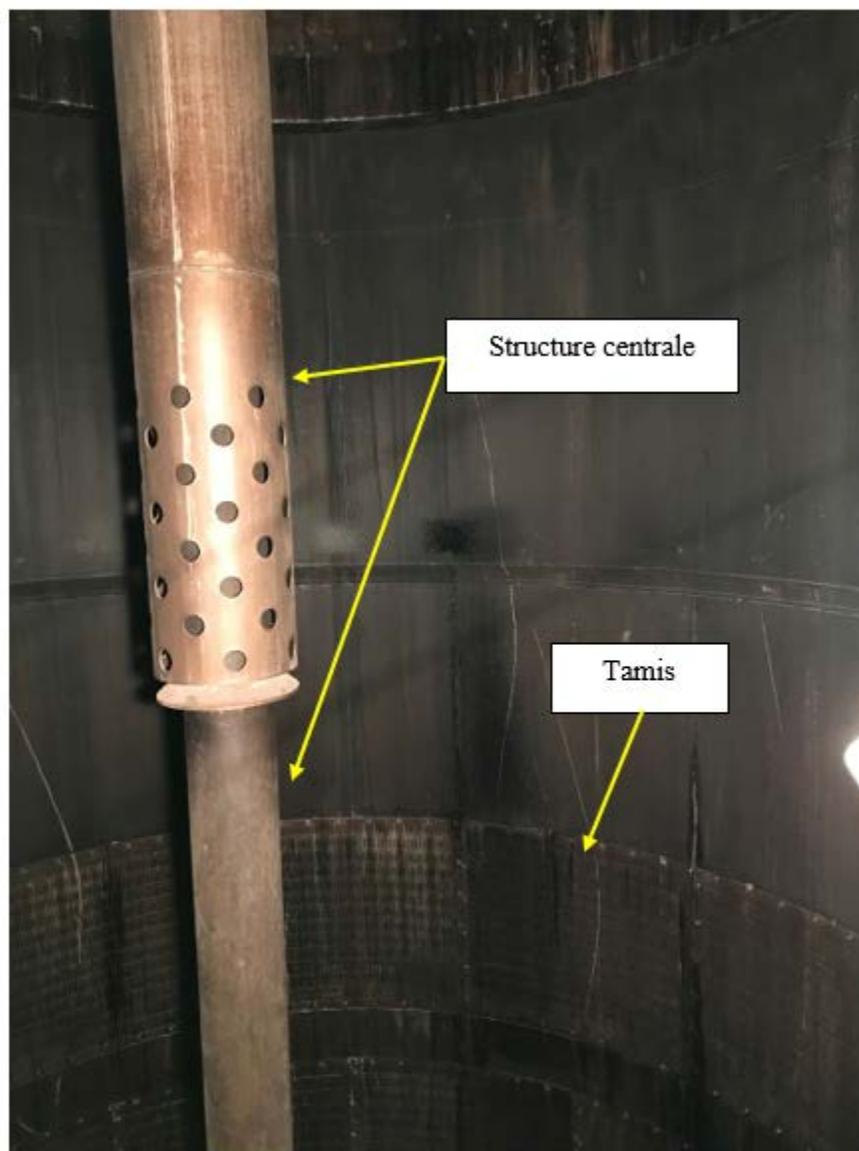


Fig. 4 - Structure centrale et tamis à l'intérieur du lessiveur  
Source : CNESST

### 3.2 Description sommaire de l'échafaudage

L'échafaudage installé dans le lessiveur est un échafaudage à rosettes de 16 niveaux d'une hauteur totale de 39 m (128 pi) avec des planchers en saillie sur les quatre faces à chacun des niveaux.

L'échafaudage dans le lessiveur est composé de deux parties, la partie basse et la partie haute. La partie basse de l'échafaudage est constituée de quatre montants à rosettes formant un carré de 3 m par 3 m (10 pi x 10 pi) sur lesquels sont installés les niveaux de plancher de travail 1 à 9. La partie haute de l'échafaudage est composée des niveaux 10 à 16. Cette partie haute est assise sur le plancher de transition (9<sup>e</sup> niveau) et est constituée de quatre montants formant un carré de 2.1 m par 2.1 m (7 pi x 7 pi) sur lesquels sont installés les niveaux de plancher de travail de 10 à 16 (voir figure 5).

**Planchers en saillie**

À l'extérieur des quatre montants de l'échafaudage se trouvent des planchers en saillie à chacun des niveaux et sur les quatre côtés. Ceux-ci permettent aux travailleurs d'aller des planchers finis se trouvant à l'intérieur des montants de l'échafaudage vers l'extérieur des montants pour accéder à la paroi interne du lessiveur (voir figure 6).

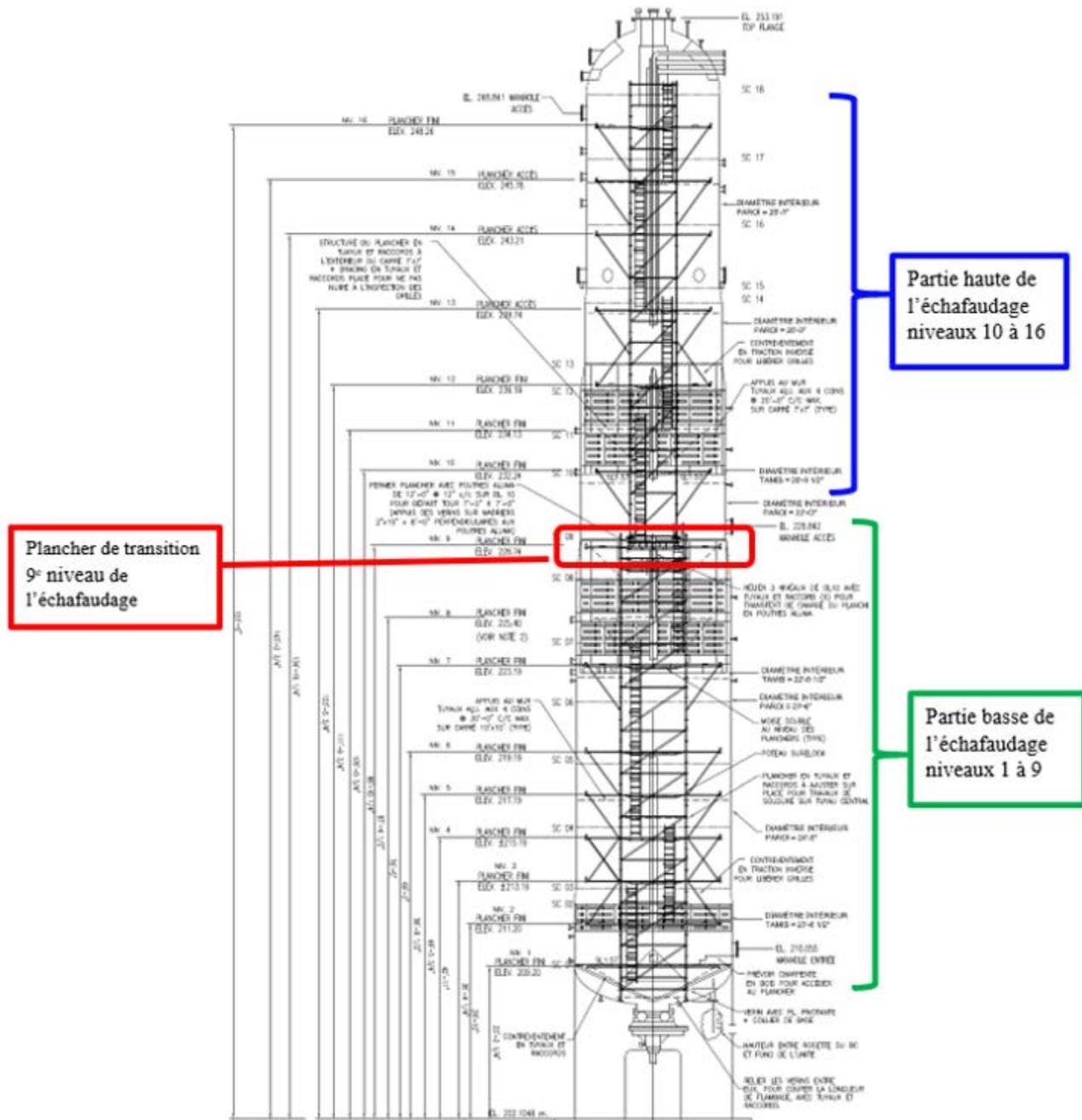


Fig. 5 – Plan de l'échafaudage installé dans le lessiveur

Source : Domtar

Modifié par : CNESST

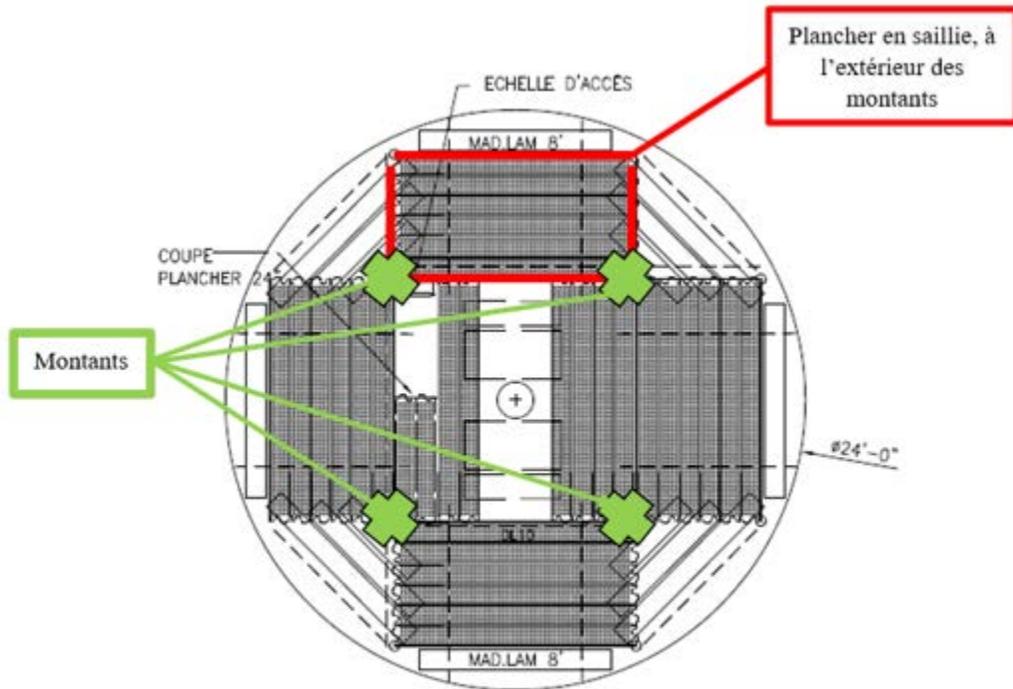


Fig. 6 – Plancher en saillie vue de dessus

Source : Domtar  
Modifié par : CNESST

### 3.3 Description du travail à effectuer

À intervalle régulier, le lessiveur est complètement vidé pour en faire l'entretien préventif. Lorsque cette situation se présente, il s'agit d'un arrêt majeur pour l'établissement puisque le lessiveur alimente le début du processus de production de pâte à papier. Dans le but de planifier ce qui est à faire, une personne désignée établit un plan de travail incluant la liste détaillée des étapes à accomplir, l'ordre dans lequel elles doivent être faites, les ressources (départements) qui seront impliquées, la ou les fiches de cadenassage à appliquer le cas échéant, le moment du début de la tâche et la durée estimée de celle-ci. C'est avec cette liste détaillée que les chargés de travaux s'organisent pour accomplir l'arrêt prolongé pour les travaux d'entretien. Les chargés de travaux font également le lien avec les travailleurs des différents sous-traitants présents chez Domtar pour l'arrêt prolongé. Les quarts de travail sont d'une durée de 12 heures. La durée totale prévue pour le présent arrêt prolongé est de 15 jours, soit du 20 octobre au 3 novembre 2021.

L'arrêt prolongé pour effectuer l'entretien du lessiveur consiste entre autres à nettoyer les tamis, vérifier le fonctionnement des sondes, inspecter et réparer au besoin les soudures circonférentielles à l'intérieur du lessiveur. Pour ce faire, le lessiveur est vidé, nettoyé chimiquement et manuellement. Une procédure de cadenassage est appliquée ainsi que la procédure pour le travail en espace clos. Domtar s'assure que des surveillants en espace clos soient présents durant toute la période où des travailleurs (monteurs d'échafaudage, mécaniciens et soudeurs) sont à l'intérieur de l'espace clos. Elle a également une procédure de sauvetage qui est appliquée par leur brigade d'intervention d'urgence constituée de pompiers formés pour intervenir en espace clos.

Les travailleurs qui se trouvent dans le lessiveur pour monter l'échafaudage ou y faire l'entretien se trouvent dans des conditions de travail propre aux espaces clos. C'est-à-dire que l'accès est restreint du fait que l'on peut y accéder seulement par des trous d'homme d'un diamètre de 61 cm (24 po), que la qualité de l'atmosphère est surveillée en continu vu la présence possible de contaminants, qu'il fait noir, que de l'éclairage d'appoint et de la ventilation sont nécessaires. De plus, les monteurs d'échafaudages doivent gérer les risques liés au travail en hauteur en portant un harnais de sécurité relié à un système de liaison antichute.

#### Monteurs d'échafaudages

Leur tâche consiste à installer l'échafaudage à rosettes de 16 niveaux en se référant au plan de conception élaboré par D [REDACTED] embauché [REDACTED].

Les monteurs d'échafaudages sont divisés en deux équipes, une qui travaille de jour (7 h à 19 h) et qui a la responsabilité de monter les niveaux d'échafaudage 1 à 9. Le 9<sup>e</sup> niveau d'échafaudage est le plancher de transition qui est entièrement fermé de façon à ne rien laisser tomber aux niveaux inférieurs.

La deuxième équipe quant à elle, travaille sur le quart de nuit (19 h à 7 h) et doit monter l'échafaudage, à partir du plancher de transition les niveaux 10 à 16.

Dans les équipes, il y a différentes tâches. Par exemple, puisque l'échafaudage est installé dans un espace clos, des monteurs doivent fournir les composantes à l'équipe se trouvant à l'intérieur par des trous d'homme.

Les outils utilisés par les monteurs sont des outils à main comme un marteau et une clé à rochet combinés (*spanner*), des barres de force, des perceuses à percussion, des meuleuses portatives, etc. Ils portent des lampes frontales pour améliorer l'éclairage ainsi que des harnais de sécurité et des enrouleurs-dérouleurs pour contrôler le risque en cas de chute. L'ancrage pour les dispositifs antichute est fait à partir des rosettes des montants de l'échafaudage ou encore sur les poutres d'aluminium qui soutiennent les planches de l'échafaudage, selon les informations obtenues.

### **Mécaniciens d'entretien et soudeurs**

Leur tâche consiste à déboulonner les tamis présents sur la paroi du lessiveur. Il y a cinq rangées de tamis, S1 à S5, situées à différents niveaux de l'échafaudage. Les mécaniciens d'entretien sont donc chargés de déboulonner les portes, de s'assurer qu'elles s'ouvrent, d'inspecter les charnières, les écrous et les remplacer au besoin.

Les outils qu'ils utilisent sont notamment des marteaux et une clé à rochet combinés, des barres de force et des perceuses à percussion. On nous indique que parfois il est impossible de défaire les boulons qui sont coincés. Dans ce cas, ceux-ci sont sciés avec une meuleuse portative.

La tâche des soudeurs consiste notamment à faire l'inspection des soudures circonférentielles et de refaire celles dont l'usure est trop importante.

Comme les monteurs d'échafaudages, les mécaniciens d'entretien et les soudeurs portent une protection antichute.

### **Ingénieur**

Outre l'élaboration du plan de montage de l'échafaudage, il est prévu que D [REDACTED] vienne faire l'inspection de l'échafaudage installé pour certifier son état de conformité au plan avant d'autoriser son utilisation. Dans la planification de l'entretien préventif préparée par Domtar, D [REDACTED] doit se déplacer à deux reprises. La première fois, il est prévu qu'il inspecte la partie basse de l'échafaudage et la deuxième, la partie haute.

**SECTION 4****4 ACCIDENT : FAITS ET ANALYSE****4.1 Chronologie de l'accident****Dimanche 24 octobre 2021**

- Vers 12 h 30 : après une rencontre entre les responsables de Domtar et ceux d'Aluma dans le local temporaire situé près du lessiveur, début de l'installation de la partie basse de l'échafaudage par l'équipe d'installation de jour. À la fin du quart de travail, l'installation n'est pas entièrement complétée. Les planchers en saillie ne sont pas tous complétés par des madriers de bois entre les madriers de métal.
- Vers 19 h : changement d'équipe de travail pour les monteurs d'échafaudages. L'équipe de nuit s'installe à partir du plancher de transition. L'installation n'est pas entièrement complétée lors de ce quart de travail.

**Lundi 25 octobre 2021**

- Vers 6 h 30 : rencontre et discussion pour le changement de quart de travail entre les chargés de travaux de Domtar.
- Vers 10 h : rencontre entre les responsables d'Aluma et de Domtar pour s'assurer que l'échafaudage ne nuit pas à l'ouverture des tamis. Il est convenu d'entrer dans le lessiveur plus tard dans la journée pour aller vérifier sur place.
- Entre 14 h et 15 h : les responsables d'Aluma et de Domtar entrent dans l'espace clos pour aller vérifier que l'ouverture des tamis est possible. Aucun problème n'est remarqué.
- Vers 18 h 30 : rencontre dans le bureau entre les responsables de Domtar et réunion avec les sous-traitants par la suite.
- Vers 19 h : échange téléphonique entre le responsable Domtar et le responsable d'Aluma afin de vérifier s'il est possible de laisser des travailleurs autres que les monteurs d'échafaudages, utiliser l'échafaudage aux niveaux inférieurs (un à neuf).
- Vers 22 h 25 : E [REDACTED] obtient par radio l'autorisation verbale pour accéder à l'intérieur du lessiveur, malgré le fait que l'installation ne soit pas entièrement complétée et sans que D [REDACTED] embauché par Aluma n'ait fait son inspection pour évaluer si l'état de l'échafaudage est sécuritaire avant de permettre son utilisation par Domtar.
- Les travailleurs commencent par accomplir leur tâche sur les tamis S1. Rien d'anormal à signaler. Par la suite, ils s'installent pour travailler sur les tamis S2 sur le niveau 7 et ils constatent que les planchers en saillie ne sont pas entièrement complétés. Ils doivent porter un dispositif de protection antichute vu le risque de chute de hauteur puisqu'ils travaillent à bout de bras au bord du vide.

**Mardi 26 octobre 2021**

- Vers 00 h 45, après le souper, [REDACTED] travailleurs rentrent dans le lessiveur pour continuer leur tâche.
- Vers 1 h 20 : E [REDACTED] entre à son tour dans l'espace clos pour s'assurer que les travailleurs ne manquent de rien. Il en ressort vers 1 h 30.
- L'effondrement de l'échafaudage se produit quelques minutes plus tard.



## 4.2 Constatations et informations recueillies

### 4.2.1 Éléments relatifs aux travailleurs décédés

#### Travailleurs décédés

Monsieur F [REDACTED] est à l'emploi de Multi-Service Blindés depuis [REDACTED], à titre de [REDACTED]. De plus, il détient des formations dans les domaines suivants: santé et sécurité du travail de l'ASP construction et espace clos.

Pour accéder à son lieu de travail chez Domtar, il a reçu de leur part lors d'une séance d'accueil, de l'information concernant les règlements généraux de Domtar.

Monsieur G [REDACTED] est à l'emploi de CRC depuis le [REDACTED] à titre [REDACTED]. Il a complété [REDACTED] ainsi que le cours santé et sécurité générale sur les chantiers de construction incluant le SIMDUT 2015, offert par l'ASP construction.

Pour accéder à son lieu de travail chez Domtar, il a reçu de leur part lors d'une séance d'accueil, de l'information concernant les règlements généraux de Domtar.

### 4.2.2 Rapport d'expertise

Afin d'identifier la ou les causes techniques ayant mené à l'effondrement de l'échafaudage à rosettes, la CNESST a mandaté l'entreprise Nadeau SDM. Leur mandat consistait entre autres à visiter les lieux, faire des relevés visuels, analyser des documents et modéliser l'échafaudage avec le logiciel SAFI. La modélisation permet de simuler différents cas de chargement afin d'évaluer si une ou des membrures de l'échafaudage ont pu s'approcher ou atteindre leur point de rupture. L'expertise est annexée au présent rapport.

### 4.2.3 Plan de conception de l'échafaudage dessiné par l'ingénieur

Le plan de conception de l'échafaudage dessiné par l'ingénieur, incluant tous les documents de références, a notamment pour fonction d'indiquer clairement aux équipes de montage, tous les renseignements nécessaires à l'érection de l'échafaudage en respectant les paramètres prévus par l'ingénieur afin de garantir la sécurité des travailleurs (monteurs, mécaniciens d'entretien et soudeurs). Des notes au plan sont aussi utilisées pour communiquer de l'information pertinente aux équipes de monteurs et aux travailleurs utilisateurs.

Au Canada, la norme de référence pour la conception d'un échafaudage est la norme *CSA – S269.2 – échafaudage d'accès pour les travaux de construction*. Cette norme énonce des directives et exigences relatives à la conception, à la fabrication et à la mise à l'essai des équipements, des matériaux et des composants des échafaudages qui seront utilisés par des travailleurs. Elle contient aussi des conseils limités sur les assemblages des échafaudages. Cette norme constitue les règles de l'art pour les ingénieurs qui conçoivent des plans d'échafaudage. Lorsqu'ils utilisent la norme, c'est une bonne pratique de l'indiquer dans un des documents de conception (plan, note de calcul, etc.). En ce qui concerne les documents produits par D [REDACTED] qui a conçu le plan d'échafaudage, aucune indication n'est faite à cet effet.

L'ingénierie structurelle prévoit différentes méthodes de conception comme l'analyse des contraintes admissibles (contraintes en service) ou encore l'analyse aux états limites. C'est l'ingénieur qui détermine la méthode qu'il va utiliser en fonction de divers critères et des charges de conception utilisées. De plus, l'utilisation de différents facteurs de sécurité dans une conception aux contraintes admissibles peut mener à des charges de conception différentes qui sont aussi sécuritaires l'une que l'autre.

L'analyse des contraintes admissibles fonctionne en dimensionnant une structure en calculant les contraintes, au niveau élastique des matériaux, provoquées par les charges et surcharges maximales prévues en les comparant avec les contraintes admissibles des matériaux. La contrainte admissible d'un matériau est égale à sa contrainte de rupture divisée par un facteur de sécurité. Cette méthode d'analyse est toujours utilisée pour élaborer des ouvrages temporaires, mais elle est de plus en plus remplacée par l'analyse aux états limites. Cette méthode de conception peut être réalisée uniquement en faisant des calculs manuels.

La méthode de conception par l'analyse aux états limites définit l'état limite comme la condition d'une structure au-delà de laquelle elle ne remplit plus les critères de conceptions en ce qui concerne les limites de capacités. Dans cette méthode, les facteurs de charges et de résistance sont déterminés à partir de statistiques et de probabilités de défaillance présélectionnée. Cette méthode de conception avancée nécessite l'utilisation d'un logiciel d'analyse et de conception qui tiennent compte de plusieurs paramètres et qui permet une visualisation en 3 dimensions.

Le but des calculs lors de la conception est d'établir la charge maximale (incluant tous les types de charges: morte, vive, dynamique) à respecter pour éviter d'atteindre la charge ultime d'une membrure, qu'elle se déforme ou qu'elle cède et que l'échafaudage s'effondre.

### **Facteur de sécurité**

Le facteur de sécurité est utilisé dans la méthode d'analyse aux contraintes admissibles pour s'assurer de la fiabilité de la conception. Il exprime à quel point un système (échafaudage) est plus solide qu'il ne doit l'être pour les charges (vive et dynamique) prévues.

Dans les notes au plan de conception utilisé chez Domtar, les facteurs de sécurité utilisés par D, sont les suivants:

- $\geq 2.2$  pour les membrures horizontales
- $\geq 3.0$  pour les membrures verticales
- $\geq 2.5$  pour les tubes et raccords.

Selon la norme *CSA – S269.2 – échafaudage d'accès pour les travaux de construction*, le facteur de sécurité à respecter pour les membrures ou la capacité nominale de la structure est de 4.

En ce qui concerne la réglementation, le *Règlement sur la santé et la sécurité du travail* est applicable et il établit à l'article 33 les conditions de conceptions et d'utilisation d'un échafaudage qui doivent être minimalement respectées.

*33. Conditions d'utilisation : les échafaudages doivent toujours être conçus en fonction du travail à exécuter et des risques d'accident. Ils doivent satisfaire aux conditions suivantes :*

*1° ils sont conçus, construits, entretoisés, contreventés et entretenus de manière à supporter les charges et les efforts auxquels ils sont soumis et à résister à la poussée des vents;*

*2° ils possèdent un facteur de sécurité d'au moins 4 pour chacun des éléments constituants;*

*3° ils reposent sur des sols ou des assises solides;*

*4° ils sont munis de garde-corps lorsque les travailleurs qui s'y trouvent risquent de tomber;*

*a) soit dans un liquide ou une substance dangereuse;*

*b) soit d'une hauteur de 1,5 m ou plus dans un puits, un bassin, un bac, un réservoir, une cuve, un récipient qui sert à l'entreposage ou au mélange des matières, ou lorsqu'ils manutentionnent une charge;*

*c) soit d'une hauteur de plus de 3 m dans les autres cas.*

En résumé, la réglementation exige que le facteur de sécurité soit de 4 pour chacune des pièces constituant l'échafaudage. Toutefois, même si toutes les pièces qui constituent un échafaudage ont un facteur de sécurité de 4, cela ne signifie pas qu'une fois les composantes assemblées dans l'échafaudage, que le facteur de sécurité de l'ensemble de celui-ci sera de 4. Pour être certain que la fiabilité de la conception résiste aux différentes charges induites à l'échafaudage en service, il faut connaître les hypothèses de conception de l'ingénieur et savoir sur quelle donnée, comme la charge morte par exemple, il a appliqué son facteur de sécurité.

### **Masse de l'échafaudage**

Un échafaudage est une structure autoportante. Il faut donc que l'échafaudage soit en mesure de résister à la contrainte de la charge morte ainsi que tous les autres types de charges vives et dynamique dans plus d'une direction. La norme *CSA 269.2 – 16 Échafaudage d'accès pour les travaux de construction* décrit ces charges et leur direction dans le tableau 2 (voir la figure 8).

**Tableau 2**  
**Charges sur les échafaudages**  
(voir l'article [6.2.1](#))

Charge	Description	Direction
DL	Poids de l'équipement	V
LL	Surcharge due aux travailleurs	V
CL	Charges additionnelles de la construction	V
H	Charges horizontales	H
W	Charges dues au vent	V/H
E	Charges environnementales	V/H

V — Charges verticales  
H — Charges horizontales

*Fig. 8 – Tableau des charges appliquées aux échafaudages*  
Source : Norme CSA 269.2-16 Échafaudage d'accès pour les  
travaux de construction

### Charge morte

Sur le plan de conception, **D** évalue la charge morte de l'échafaudage à 16 289 kg (35 911 lb). Dans le rapport d'expertise, l'estimation de la charge morte faite à partir du plan de conception en utilisant exclusivement des membrures de marque Aluma est de 19 054 kg (42 007 lb). Le poids de l'ensemble des composantes recueillies des décombres est de 20 415 kg (45 008 lb).

En observant les chiffres précédents, on voit que l'écart de la valeur de conception par rapport à la charge morte réelle mesurée à partir des décombres est de 25.3%.

### Charge vive et charge dynamique

Il est possible de calculer les effets de ces charges en utilisant un logiciel comme SAFI. Les experts en ingénierie des structures à qui la CNESST a confié le mandat d'expertise ont accès à ce logiciel. Ils ont saisi toutes les données techniques concernant les membrures utilisées en se fiant au plan de conception, en considérant qu'elles étaient toutes neuves et qu'elles provenaient d'un seul et même fournisseur soit Aluma. La simulation avec SAFI s'est faite dans ces conditions optimales.

À l'aide de ce logiciel, différents cas de chargement ont été examinés pour vérifier dans quelles conditions s'est produit l'effondrement. Par exemple, la charge vive produite par deux travailleurs se trouvant au niveau 7 de l'échafaudage dont un situé au bout du plancher en saillie et un deuxième près de la partie centrale du plancher fini ou encore lorsque deux travailleurs se trouvent au bout du même plancher en saillie. Vous trouverez ces cas de chargement plus détaillés dans le rapport d'expertise annexé au présent rapport à l'annexe E.

Il est démontré avec ce logiciel qu'il y a effondrement de l'échafaudage uniquement lorsque la charge vive produite par le poids de deux travailleurs qui se trouvent au bout du plancher est appliquée sur les

diagonales qui soutiennent le plancher en saillie du septième niveau. Les charges dynamiques comme l'application d'une force supplémentaire par un travailleur pour déboulonner les boulons à l'aide d'un outil n'ont pas été nécessaires pour produire l'effondrement selon l'analyse avec le logiciel.

### **Contreventement**

Un des moyens utilisés pour répartir la charge à l'ensemble de la structure est l'utilisation de contreventement. Il a aussi pour fonction d'empêcher tout déplacement latéral d'une structure, de la maintenir alignée.

Au plan de conception élaboré par D [REDACTED], il y a absence de contreventement au niveau des diagonales qui supportent le plancher en saillie du niveau 7 (voir la figure 9).

### **Capacité de charge maximale du plancher en saillie du niveau 7**

En ce qui concerne la capacité de charge maximale des planchers, une des notes au plan spécifie la charge maximum permise sur les plates-formes de travail dans ces termes: *25 lb/pi<sup>2</sup>. 10 personnes dans le vase clos en même temps max.* Selon la norme CSA S269.2 - *Échafaudage d'accès pour les travaux de construction*, cette capacité indique la catégorie de service léger c'est-à-dire « une plate-forme destinée à supporter l'équivalent d'une charge uniformément répartie de 1.2 kN/m<sup>2</sup> (25 lb/pi<sup>2</sup>) sur sa surface, telle que celle des travailleurs et de leurs outils à main personnels, sans aucun matériau entreposé ». Cependant, il y a absence de précision à savoir à quels planchers la catégorie de service s'applique (uniquement aux planchers finis à l'intérieur des montants, aux planchers en saillie ou à tous les planchers sans distinction).

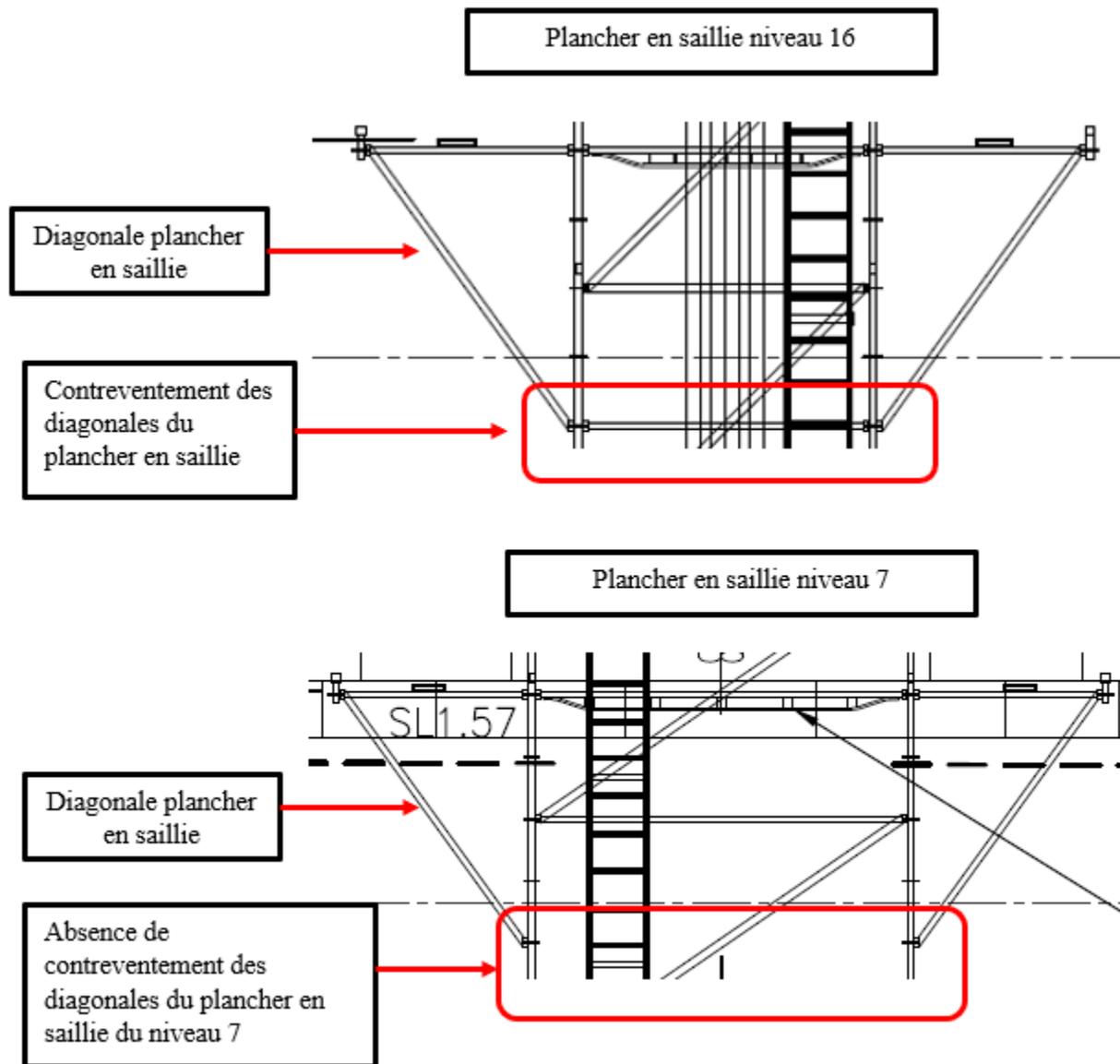


Fig. 9 – Niveaux de plancher en saillie avec et sans contreventement

Source : Domtar

Modifié par : CNESST

### Flambage d'un montant d'un échafaudage

Sur un montant à rosette, le flambage est une déformation du montant qui survient lorsque la charge longitudinale (compression) est supérieure à la charge ultime du montant. Toutefois, il est important de tenir compte de toutes les directions dans lesquelles une charge peut être appliquée. Dans le présent cas, le rapport d'expertise explique que les diagonales qui soutiennent les planchers en saillie du niveau 7 viennent ajouter une charge horizontale (en flexion) qui n'est pas répartie à l'ensemble de la structure puisqu'il n'y a pas de contreventement. La combinaison de charge longitudinale et horizontale a donc pu initier le flambage et la rupture du montant (voir la figure 10).

La simulation avec le logiciel SAFI confirme qu'il y a effondrement en l'absence de contreventement et que cette situation est évitée si un contreventement est en place.

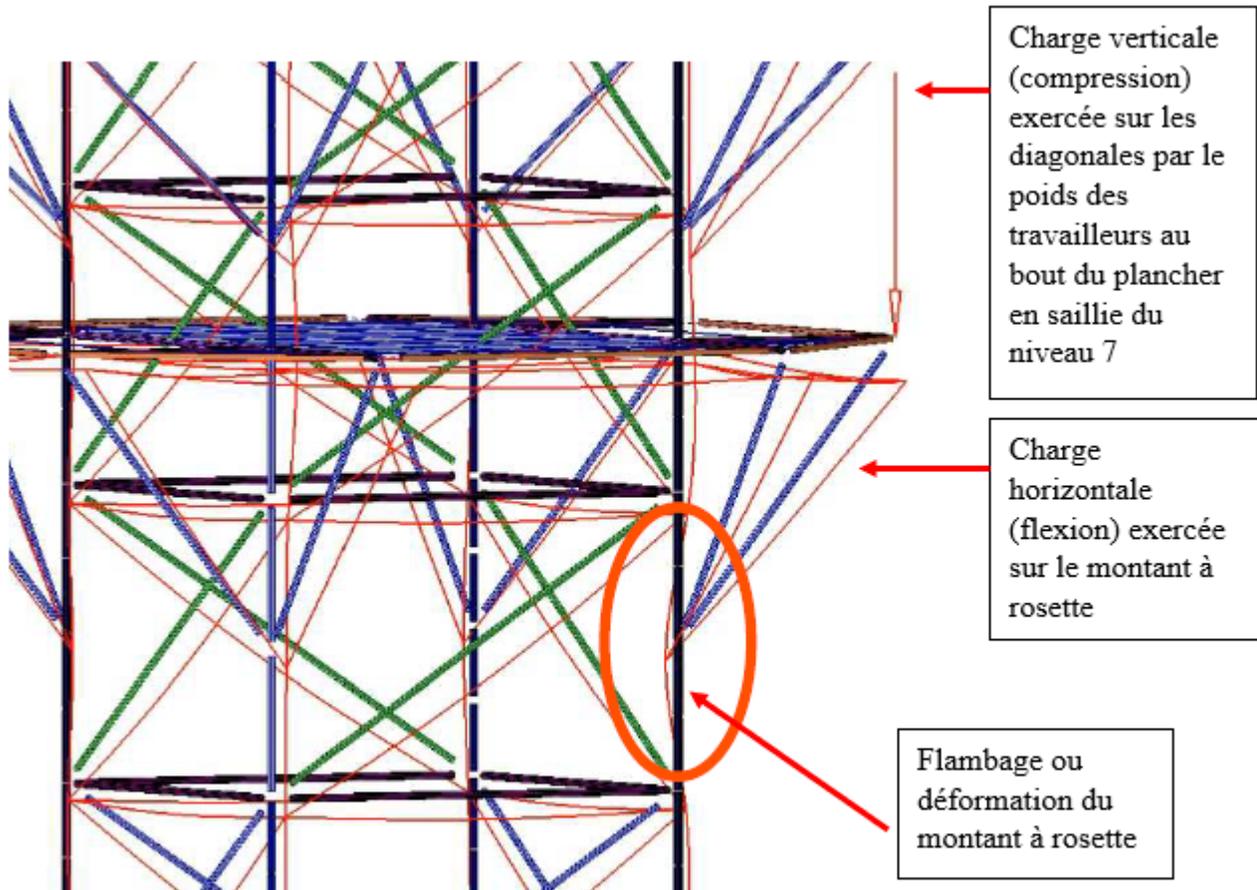


Fig. 10 – *flambage d'un montant à rosette*  
Source : rapport d'expertise Nadeau SDM  
Modifié par : CNESST

### Autres facteurs ayant pu contribuer à l'effondrement

L'expertise mentionne également que d'autres facteurs ont pu contribuer dans l'effondrement, mais d'une manière impossible à déterminer dans les circonstances. Alors nous n'avons pas investigué davantage ces éléments.

Il s'agit notamment de:

- Des divergences entre l'installation et le plan de conception;
- Le niveau d'usure ou des dommages aux composantes;
- L'utilisation de composantes de différents fournisseurs dont les capacités varient d'un modèle à l'autre ainsi que la compatibilité entre les différentes marques de composantes.

### 4.3 Énoncés et analyse des causes

#### 4.3.1 Énoncé de la première cause.

**La conception de l'échafaudage comporte des lacunes quant au facteur de sécurité utilisé, à la charge morte de l'échafaudage sous-estimée et à l'absence de contreventement des diagonales qui soutiennent le plancher en saillie du niveau 7.**

Aucune note ou indication dans les documents de conception analysés ne nous permettent de confirmer si la norme CSA S269.2 - *Échafaudage d'accès pour les travaux de construction*, qui constitue les règles de l'art, a été utilisé lors de la conception de l'échafaudage.

La réglementation et les règles de l'art exigent un facteur de sécurité de 4 afin d'assurer la fiabilité de la conception. Les facteurs de sécurité choisis par D [REDACTED] qui sont inférieurs à 4 ne respectent ni la réglementation ni les règles de l'art. Un facteur de sécurité inférieur représente donc une diminution de la fiabilité de l'échafaudage à supporter les charges prévues.

En ce qui a trait à la charge morte, nous notons une différence entre les calculs de la charge morte théorique calculée par D [REDACTED] et la charge morte réelle des éléments pesés après l'effondrement. Cette constatation démontre que la charge morte est sous-estimée par D [REDACTED] par rapport à ce qu'elle est réellement. Les membrures qui supportent cette charge morte sont les montants à rosette et sont donc davantage sollicitées.

Au surplus, sur le plan, il y a absence de contreventement pour maintenir aligné le montant à rosettes à l'endroit où les diagonales qui soutiennent le plancher en saillie du niveau 7 viennent s'appuyer au montant. Selon l'analyse avec SAFI, les charges mortes et vives ont contribué à l'atteinte de la charge ultime de ce montant ce qui fait qu'il n'a pu résister aux charges en présence et a flambé. La présence d'un contreventement à cet endroit aurait permis de répartir les charges à l'ensemble de la structure et d'éviter l'effondrement, ce que confirme une simulation avec le logiciel SAFI.

La conséquence d'une charge morte sous-estimée combinée à un facteur de sécurité de moins de 4 signifie une plus grande sollicitation des montants à rosettes et une marge de manœuvre réduite. Lors de l'événement, la combinaison des charges mortes et vives sur le montant à rosettes non contreventé a contribué à l'atteinte de la charge ultime de ce montant, ce qui a entraîné le flambage, la rupture puis finalement, l'effondrement de l'échafaudage.

Cette cause est retenue.

#### 4.3.2 Énoncé de la deuxième cause.

**La charge ultime d'un des montants à rosettes est atteinte ce qui provoque sa rupture et l'effondrement de l'échafaudage.**

Selon le rapport d'expertise, « l'effondrement a pris origine au niveau d'un des 4 poteaux verticaux localisés sous le plancher en saillie du niveau 7. Il a été démontré que ce poteau, chargé en compression/flexion était sollicité à 121% si deux travailleurs se trouvent au bout du plancher, soit directement au-dessus de la diagonale ».

Les charges en flexion induite par les diagonales du plancher en saillie du niveau 7 qui n'ont pu être distribuées au reste de la structure par un contreventement et la charge en compression induite par la charge totale de l'échafaudage au-dessus du niveau 7 ont entraîné la rupture du montant de l'échafaudage et par le fait même l'effondrement de celui-ci.

Cette cause est retenue.

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

- La conception de l'échafaudage comporte des lacunes quant au facteur de sécurité utilisé, à la charge morte de l'échafaudage sous-estimée et à l'absence de contreventement des diagonales qui soutiennent le plancher en saillie du niveau sept.
- La charge ultime d'un des montants à rosettes est atteinte ce qui provoque sa rupture et l'effondrement de l'échafaudage.

**5.2 Suivis de l'enquête**

La CNESST transmettra les conclusions de son enquête à l'association québécoise de l'industrie de l'échafaudage à l'ordre des ingénieurs du Québec, à l'association de la construction du Québec, à l'association québécoise des entrepreneurs en infrastructure, à l'association des professionnels de la construction et de l'habitation du Québec, à l'association des entrepreneurs en construction du Québec, à l'association des entrepreneurs en maçonnerie du Québec et à PréviBois.

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.

Le rapport sera acheminé au comité-conseil sur la révision du Règlement sur la santé et la sécurité du travail (3.33.2) afin de les informer des conclusions de l'enquête.

**ANNEXE A****Accidenté**

**Nom, prénom** : F [REDACTED]

**Sexe** : [REDACTED]

**Âge** : [REDACTED]

**Fonction habituelle** : [REDACTED]

**Fonction lors de l'accident** : journalier - soudeur

**Expérience dans cette fonction** : [REDACTED]

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

**Syndicat** : [REDACTED]

**Accidenté**

**Nom, prénom** : G [REDACTED]

**Sexe** : [REDACTED]

**Âge** : [REDACTED]

**Fonction habituelle** : [REDACTED]

**Fonction lors de l'accident** : homme à tout faire

**Expérience dans cette fonction** : [REDACTED]

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

**Syndicat** : [REDACTED]

**ANNEXE B****Liste des personnes interrogées**

Monsieur Sylvain Bricault, directeur général, Domtar inc.

Monsieur H [REDACTED], Domtar inc.

Monsieur I [REDACTED], Domtar inc.

Monsieur J [REDACTED], Domtar inc.

Monsieur A [REDACTED], Domtar inc.

Monsieur K [REDACTED], Domtar inc.

Monsieur L [REDACTED], Domtar inc.

Monsieur M [REDACTED], Domtar inc.

Monsieur N [REDACTED], Domtar inc.

Monsieur Nicolas Legault, directeur régional, AlumaSafway inc.

Madame O [REDACTED], AlumaSafway inc.

Monsieur P [REDACTED], AlumaSafway inc.

Monsieur Q [REDACTED], AlumaSafway inc.

Monsieur R [REDACTED], AlumaSafway inc.

Monsieur S [REDACTED], AlumaSafway inc.

Monsieur T [REDACTED], AlumaSafway inc.

Monsieur U [REDACTED], AlumaSafway inc.

Monsieur V [REDACTED], AlumaSafway inc.

Monsieur D [REDACTED], Boileau & Associés inc.

Monsieur David Marchand, président, Service d'entretien Piervan inc.

Monsieur Jean-Philippe Therrien, directeur général, Métafab Therrien

Monsieur W [REDACTED], Métafab Therrien

Monsieur Émile Cardin, directeur général, Mécanique industrielle CRD

Monsieur X [REDACTED], Mécanique industrielle CRD

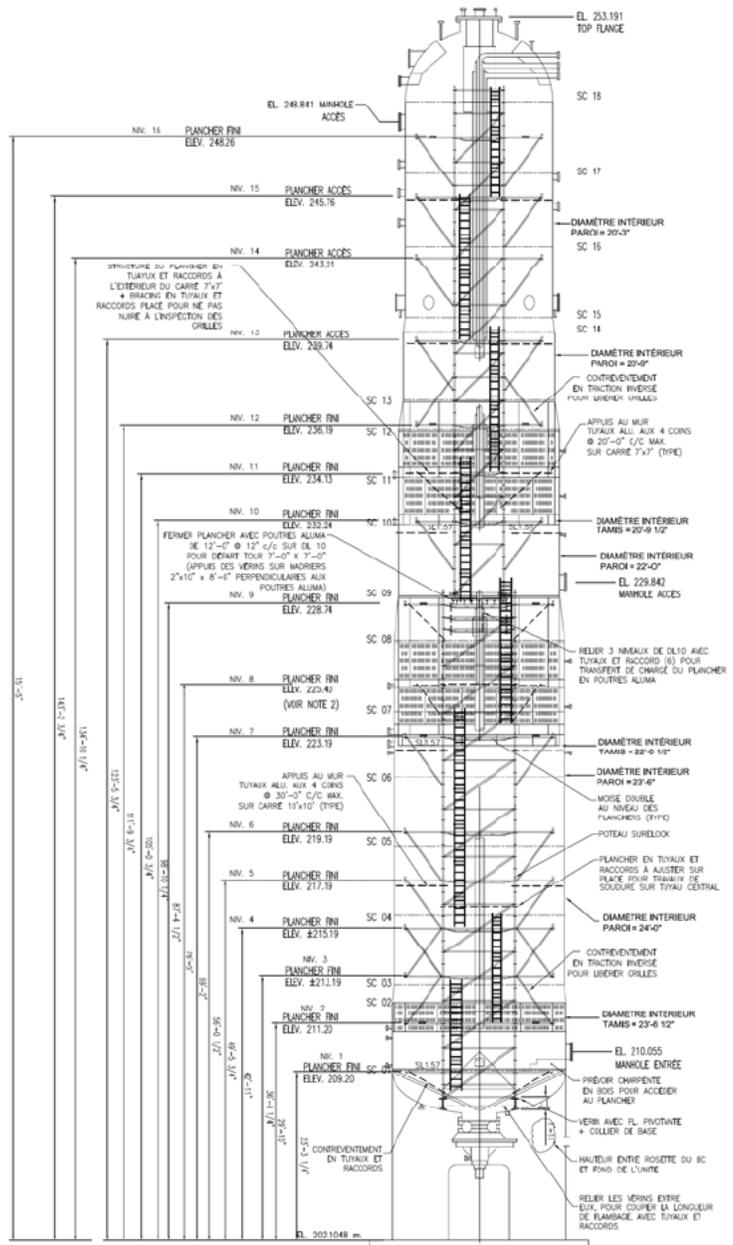
Monsieur Éric Petitclerc, directeur général, Multi Services Blindés inc.

Monsieur Keven Petitclerc, directeur général, Les Entreprises CRC inc.

Monsieur Y [REDACTED] GardaWorld sécurité

Monsieur Z [REDACTED], GardaWorld sécurité

**ANNEXE C**  
**Plan échafaudage d'accès**  
**Projet lessiveur (échafaudage partiel)**



**ELEVATION**

- NOTES:
1. PLANCHER PLEIN POUR ACCES EN TUBAUX ET RACCORDS SI NECESSAIRE
  2. SUPPORT DE PLANCHER CONSTRUIT EN TUBAUX ET RACCORDS
- NOTE: INSTALLER DES ANTI-CHUTE RETENABLE POUR GESSER LES ESCALIER D'ACCES

**NOTES GENERALES**

**DESCRIPTION**  
 CE PLAN EST ELABORE POUR L'INSTALLATION DES PLYE-FORMES DE TRAVAIL TEMPORAIRES A L'INTERIEUR DU MAN VASE D'OS

**FACTEUR DE SECURITE**  
 MEMBRE DE SECURITE: F.S. = 2.2  
 MEMBRE VERTICAL: F.S. = 2.0  
 TUBE & RACCORDS: F.S. = 2.5

**CHARGE**  
 CHARGE MAXIMUM PERMISE PAR LES MATERIEUX DE TRAVAIL: 25 LB/PI<sup>2</sup> - 10 PERSONNES DANS LE MAN CLOS EN MEME TEMPS MAX.

**PROCEDE DE CONSTRUCTION**  
 - LE MONTAGE DE L'ECARQUAGE DOIT ETRE ATTESTE COMME ETANT CONFORME AU PROCEDE POUR UN MONTAGE AVANT D'ETRE PERMIS DE TRAVAILLER A L'INTERIEUR DU MAN VASE D'OS. LES TRAVAILLERS NE DOIVENT PAS SE TROMPER EN PENSANT QUE LE MAN VASE D'OS EST UN MAN VASE D'OS. LE MAN VASE D'OS EST UN MAN VASE D'OS. LE MAN VASE D'OS EST UN MAN VASE D'OS.

**PROCEDE DE SECURITE**  
 LE POINT D'UN MANHOLE DE SECURITE EST OBLIGATOIRE SI UN TRAVAILLIER EST EXPOSE A UNE CHUTE DE PLUS DE 3 METRES DE LA PARTIE SUPERIEURE DU MAN VASE D'OS. LE MAN VASE D'OS EST UN MAN VASE D'OS.

**MONTAGE ET DEMONTAGE**

LE MONTAGE ET LE DEMONTAGE DES ECARQUAGES DOIVENT ETRE REALISES EN CONFORMITE AVEC LE MANUEL D'INSTRUCTIONS PERSONNE QUALIFIE.

TOUTES LES PARTIES D'UN ECARQUAGE DOIVENT ETRE VERIFIEES PAR UNE PERSONNE QUALIFIEE AVANT D'ETRE MISE EN PLACE.

APPORTEZ LES PRECAUTIONS DE MONTAGE ET DE DEMONTAGE, TOUTES LES MESURES DE SECURITE DOIVENT ETRE PRISES POUR EVITER LA CHUTE DE PERSONNES OU D'OBJETS.

DESI-QUE LES ECARQUAGES SONT MONTES, LES TRAVAILLERS NE DOIVENT PAS SE TROMPER EN PENSANT QUE LE MAN VASE D'OS EST UN MAN VASE D'OS.

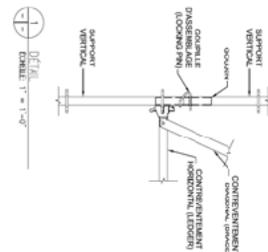
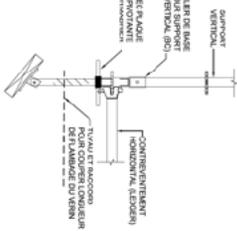
APPORTEZ LE MONTAGE CUILE DEMONTAGE D'UN ECARQUAGE, TOUT EN TRAVAILLANT DENTRE.

1. ETRE EXECUTE SEULEMENT SUR DES SECTIONS BENEDEFICES TRAVAILLABLES EN SECURITE POUR LES TRAVAILLERS DE CONSTRUCTION ET

2. LE MAN VASE D'OS NE DOIT PAS ETRE UTILISE POUR LE MONTAGE DE TRAVAILLERS EN SECURITE POUR LES TRAVAILLERS DE CONSTRUCTION ET

3. LE MAN VASE D'OS NE DOIT PAS ETRE UTILISE POUR LE MONTAGE DE TRAVAILLERS EN SECURITE POUR LES TRAVAILLERS DE CONSTRUCTION ET

4. LE MAN VASE D'OS NE DOIT PAS ETRE UTILISE POUR LE MONTAGE DE TRAVAILLERS EN SECURITE POUR LES TRAVAILLERS DE CONSTRUCTION ET

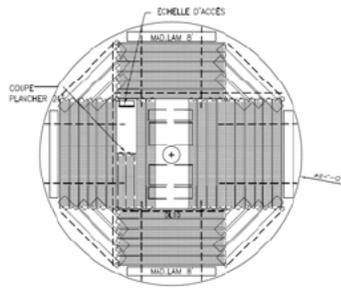


**BOLEAU & ASSOCIES**  
 2880 MONTREAL STREET, SUITE 100  
 MONTREAL, QUEBEC H3T 1E6  
 TEL: (514) 383-8888  
 FAX: (514) 383-8888

NO	DATE	DESCRIPTION	VER. PAR
1	28 sep 21	PROJ. FINISSE ETAL - 0807 JANVIER 2021	FB
2	18 sep 21	PROJ. CORRECTION - 0807 JANVIER 2021	FB

**Aluma SAFWAY**  
 2880 MONTREAL STREET, SUITE 100, MONTREAL, QUEBEC H3T 1E6  
 TEL: (514) 383-8888  
 FAX: (514) 383-8888

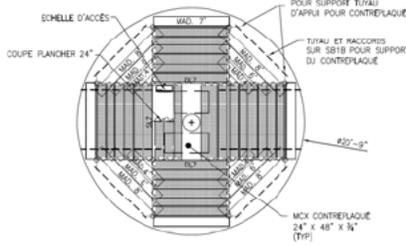
**CLIENT** : MANHOLE D'ACCES  
**PROJET** : MANHOLE D'ACCES  
**DATE** : 08 sep 21  
**PROJETE** : JESSYVEIN (CHAMPAUD PARTIE)  
**DESIGNER** : MANHOLE D'ACCES  
**CLIENT** : MANHOLE D'ACCES  
**CONTR. NO** :  
**DESIGN. #** : S/11  
**REV. #** : 1



**PLAN - NIV. 3, 4, 5, 6**

Echelle: 3/16"=1"

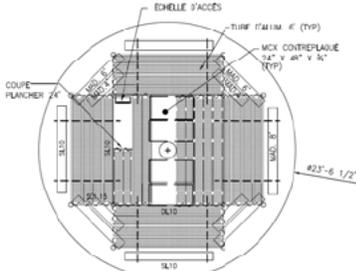
FERMER PLANCHER CONTRE LE MUR (ESPACE MAXIMUM ENTRE LE MUR ET PLANCHER = 6 POUCES)



**PLAN - NIV. 10, 11, 12**

Echelle: 3/16"=1"

FERMER PLANCHER CONTRE LE MUR (ESPACE MAXIMUM ENTRE LE MUR ET PLANCHER = 6 POUCES)  
NIVEAU 11 : SUPPORTS DE PLANCHER EN TUBES ET RACCORDS = SEULEMENT SI REQUIS POUR L'INSPECTION DES GRILLES

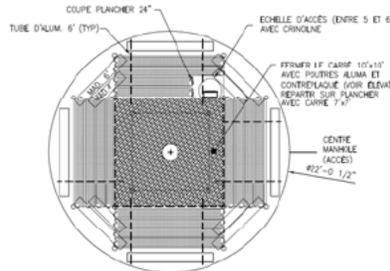


**PLAN - NIV. 2**

Echelle: 3/16"=1"

FERMER PLANCHER CONTRE LE MUR (ESPACE MAXIMUM ENTRE LE MUR ET PLANCHER = 6 POUCES)

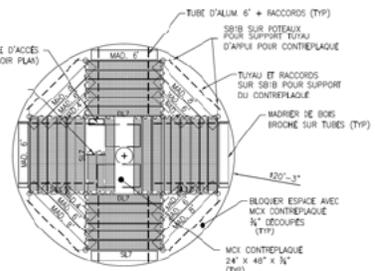
SUPPORTS DE PLANCHER EN TUBES ET RACCORDS = SEULEMENT SI REQUIS POUR L'INSPECTION DES GRILLES



**PLAN - NIV. 9**

Echelle: 3/16"=1"

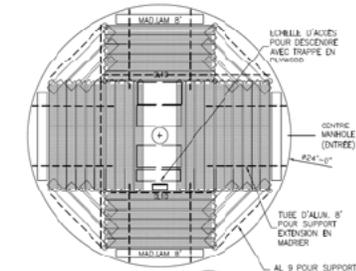
LE PLANCHER DOIT ETRE ETANCHE CONTRE LA PARI SUR TOUT LE PERIMETRE (AVEC CONTREPLAQUE)



**PLAN - NIV. 14, 15, 16**

Echelle: 3/16"=1"

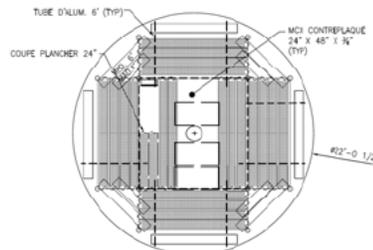
FERMER PLANCHER CONTRE LE MUR (ESPACE MAXIMUM ENTRE LE MUR ET PLANCHER = 6 POUCES)



**PLAN - NIV. 1**

Echelle: 3/16"=1"

FERMER PLANCHER CONTRE LE MUR (ESPACE MAXIMUM ENTRE LE MUR ET PLANCHER = 6 POUCES)

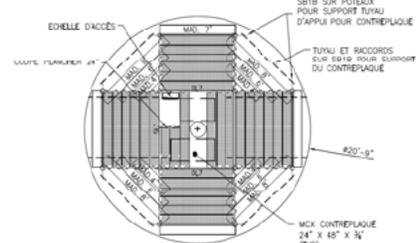


**PLAN - NIV. 7.8**

Echelle: 3/16"=1"

FERMER PLANCHER CONTRE LE MUR (ESPACE MAXIMUM ENTRE LE MUR ET PLANCHER = 6 POUCES)

NIVEAU 8 : SUPPORTS DE PLANCHER EN TUBES ET RACCORDS = SEULEMENT SI REQUIS POUR L'INSPECTION DES GRILLES



**PLAN - NIV. 13**

Echelle: 3/16"=1"

FERMER PLANCHER CONTRE LE MUR (ESPACE MAXIMUM ENTRE LE MUR ET PLANCHER = 6 POUCES)

<p><b>BOLEAU &amp; ASSOCIES</b> Ingénierie-contrôle Construction-Compagnie</p>		<p>465 Rue Wellington, C-14 Montréal, Québec H3A 2K4 Tél: (514) 393-1111</p>	
<p>PROJET: <b>ALUMA SAFWAY</b></p> <p>CLIENT: <b>MINOSOR OC</b></p> <p>ARCHITECTE: <b>ZOMTAR</b></p>	<p>DATE: 18 SEPT 21</p> <p>PROJETS: 22 SEPT 21</p> <p>NO: 01</p>	<p>OBJET: <b>SAFWAY</b></p> <p>PROJET: <b>SAFWAY</b></p> <p>CLIENT: <b>MINOSOR OC</b></p> <p>ARCHITECTE: <b>ZOMTAR</b></p>	<p>DATE: 18 SEPT 21</p> <p>PROJETS: 22 SEPT 21</p> <p>NO: 01</p>
<p>2888, MONTE-LAURENT-FRANCOIS, L'AMAL, QUÉBEC, H7E 4P7 TEL: (514) 343-8888 FAX: (514) 343-1888</p>		<p>2018 CONSTRUCTION - ARRET JANVIER 2021 POUR CONSTRUCTION - ARRET JANVIER 2021</p>	
<p>CONTRÔLE: <b>INDIVIDUEL</b></p> <p>DESIGN: <b>S-12</b></p> <p>REV: <b>1</b></p>		<p>CONTRÔLE: <b>INDIVIDUEL</b></p> <p>DESIGN: <b>S-12</b></p> <p>REV: <b>1</b></p>	

**ANNEXE D**



**ANNEXE E**  
**Rapport d'expertise**

# EXPERTISE STRUCTURALE

**PRÉSENTÉ À**

CNESST Estrie  
1650, rue King Ouest, Bur. 204  
Sherbrooke (QC), J1J 2C3

**RÉALISÉ PAR**

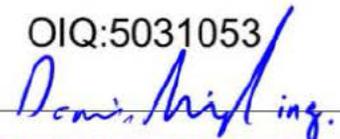
NadeauSDM, Génie des structures  
200-750, Chemin Olivier, Lévis (QC), G7A  
2P7  
T 418 204.8151 / info@nadeausdm.ca

**PROJET S21257****Analyse post-effondrement  
des échafaudages d'accès du  
lessiveur, usine Domtar****Révision : 0, 2022-06-02**

OIQ: 5028066

**SIMON NADEAU, ING.**

OIQ:5031053

**DOMINIC MICHAUD, ING. M.SC**

# TABLE DES MATIÈRES

Table des matières.....	1
Liste des figures .....	4
Liste des tableaux .....	5
Mise en contexte et descriptions .....	6
Mandat .....	6
Réserves et limitations .....	6
Documents de référence.....	7
Définitions .....	8
Identification des composantes.....	9
Contexte normatif .....	10
Facteur de sécurité .....	10
Norme.....	10
Pratique actuelle .....	10
Situation à l'effondrement .....	11
Observations/faits rapportés et analyses générales .....	12
Hypothèses de conception.....	12
Observations .....	12
Commentaires .....	12
Équipements utilisés.....	13
Observations .....	13
Commentaires .....	15
Masse de l'échafaudage.....	16
Observations .....	16
Faits rapportés .....	16
Analyses.....	17
Commentaires .....	17
Appui vertical à la base.....	17
Observations .....	17
Commentaires .....	18
Plancher de transition.....	18
Observations .....	18
Analyses.....	19
Commentaires .....	19
Stabilisation latérale externe .....	20

Observations .....	20
Commentaires .....	21
Contreventements internes.....	22
Observations .....	22
Analyses.....	23
Commentaires .....	24
Planchers en saillie .....	24
Observations .....	24
Commentaires .....	25
Montage/installation .....	26
Appui vertical à la base.....	26
Observations .....	26
Commentaires .....	27
Contreventements internes.....	27
Observations .....	27
Commentaires .....	31
Planchers en saillie .....	32
Observations .....	32
Commentaires .....	32
Analyses structurales par logiciel.....	33
Modèles 3d et hypothèses.....	33
Composantes de l'échafaudage.....	33
Poteaux verticaux continus des niveaux 1 à 9 et des niveaux 9 à 16 .....	34
Butées latérales externes efficaces.....	34
Montage/érection de l'échafaudage correspondant aux plans et devis.....	35
Cas de chargement .....	35
Charge morte .....	35
Charge vive .....	35
Charges dynamiques.....	36
Type d'analyse menée.....	36
Analyse statique linéaire .....	36
Analyse statique P-Delta .....	37
Résultats d'analyse .....	37
Discussion.....	38
Conclusions.....	39
Mode d'effondrement.....	39
Causes.....	39
Facteur de sécurité de conception insuffisant .....	39

Masse de l'échafaudage sous-estimée.....	39
Absence d'élément stabilisant le poteau sous le niveau 7.....	39
Hypothèses de calcul erronées quant à la retenue latérale des poteaux verticaux.....	39
Hypothèses de conception limitatives.....	40
Manque d'encastrement aux butées latérales.....	40
Absence d'exigences de capacité minimale des équipements / équipements provenant de différents fournisseurs / manufacturiers.....	40
Appui vertical à la base.....	40
Causes impondérables.....	40
Divergences entre l'installation effectuée et les plans pour construction.....	40
Usure/dommage des composantes.....	40
Mauvaise manipulation.....	41
Sommaire.....	41
ANNEXE 1 - Analyse de masse de l'échafaudage.....	I
ANNEXE 2 - Liste des équipements reçus.....	II
ANNEXE 3 - [REDACTED].....	III

# LISTE DES FIGURES

Figure 1 - Hypothèses de conception .....	12
Figure 2 - Répartition des charges .....	12
Figure 3 - Extrait des plans, poteau « Sure Lock » .....	13
Figure 4 - Extrait des plans, identification DL10 .....	14
Figure 5 - Poutrelle simple « Sure Lock » .....	14
Figure 6 - Photo modèles de poutrelles simples .....	15
Figure 7 - Photo modèles de poutrelles simples .....	15
Figure 8 - Extrait de la note de calcul, estimation de la masse de l'échafaudage par .....	16
Figure 9 - Extrait des plans, appui à la base .....	17
Figure 10 - Vérins ajustables à pied pivotant .....	18
Figure 11 - Photo du vérin .....	18
Figure 12 - Extrait des plans, plancher de transition .....	19
Figure 13 - Comportement poutrelles simples .....	19
Figure 14 - Extrait des plans, stabilisation latérale - (Baie 10' x 10') .....	20
Figure 15 - Extrait des plans, stabilisation latérale - (Baie 7' x 7') .....	20
Figure 16 - Extrait des plans, contreventement plancher transition .....	21
Figure 17 - Exemple d'encastrement de butées .....	21
Figure 18 - Extrait de la note de calcul, capacité des poteaux verticaux .....	22
Figure 19 - Diagramme d'interaction « Sure Lock » .....	23
Figure 20 - Extrait des plans, contreventements intérieurs .....	24
Figure 21 - Extrait des plans, plancher en saillie typique .....	24
Figure 22 - Extrait des plans, plancher en saillie (ass. tuyaux et raccords) .....	25
Figure 23 - Extrait des plans, appui des planchers en saillie .....	25
Figure 24 - Exemple membrure oblique .....	26
Figure 25 - Appui #1 sans tuyau (Drone) .....	27
Figure 26 - Appui #2 sans tuyau (Drone) .....	27
Figure 27 - Extrait des plans, identification des contreventements .....	28
Figure 28 - Prise #1 - Manhole - Face (Drone) et extrait des plans correspondants .....	28
Figure 29 - Prise #2 - Manhole - Face (Drone) .....	29
Figure 30 - Prise #3 - Manhole - Face - Niv 2 (Drone) .....	29
Figure 31 - Prise #4 - Manhole - Face - Niv 2 (Drone) .....	30
Figure 32 - Prise #5 - Manhole - Gauche - Niv 2 (Drone) .....	30
Figure 33 - Prise #2 - Manhole - Gauche (Drone) .....	31
Figure 34 - Prise #5 - Manhole - Arrière (Drone) .....	31
Figure 35 - Prise #3 - Manhole - Gauche .....	32
Figure 36 - Représentation 3d du modèle 1 .....	33
Figure 37 - Extrait manuel d'ingénierie « Sure Lock », manchon de colonne .....	34
Figure 38 - Extrait manuel d'ingénierie « Sure Lock », charge admissible poteaux .....	34
Figure 39 - Représentation visuelle, cas de chargement 1 .....	35
Figure 40 - Représentation visuelle, cas de chargement 2.a .....	35
Figure 41 - Représentation visuelle, cas de chargement 2.b .....	36
Figure 42 - Représentation visuelle, cas de chargement 2.c .....	36
Figure 43 - Déformée de la colonne sous le niveau 7 (amplifiée 50mm = 1m) .....	37

# LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 - Nomenclature des pièces.....	10
Tableau 2 - Identification de fournisseurs / distributeurs.....	14
Tableau 3 - Comparatifs de la charge admissible d'équipements.....	16
Tableau 4 - Propriétés des membrures.....	33
Tableau 5 - Sommaire des résultats d'analyse.....	38

# MISE EN CONTEXTE ET DESCRIPTIONS

## MANDAT

Dans la nuit du 26 octobre 2021, l'échafaudage en cours d'érection dans le lessiveur de l'usine Domtar inc à Windsor s'est partiellement effondré, entraînant la mort de deux ouvriers. Dans le cadre de ces événements, NadeauSDM a été mandaté afin d'en faire l'expertise technique et d'ainsi tenter d'identifier certaines causes probables de l'effondrement. Simon Nadeau, ing. et Dominic Michaud, ing. M.Sc ont mené conjointement cette expertise.

Le mandat octroyé à NadeauSDM consistait plus précisément à :

- Phase 1
  - Visiter les lieux et procéder à un relevé visuel (visites menées les 28 octobre, 1<sup>er</sup> novembre, 4 novembre et 8 novembre 2021);
  - Supporter et guider la CNESST dans son travail en leur fournissant des analyses préliminaires et commentaires face aux observations.
- Phase 2
  - À partir du plan initial et des charges réelles appliquées au chantier (travailleurs, outils, etc.), évaluer si une ou des composantes de l'échafaudage ont pu atteindre ou s'approcher de leur point de rupture (flambage, torsion, etc.). Cette analyse consiste à évaluer l'échafaudage "tel que conçu" et non "tel que construit";
  - Procéder à une analyse poussée de la capacité portante de l'échafaudage;
  - Analyser la situation et informer la CNESST des causes probables de l'effondrement.
- Phase 3
  - Synthétiser toute l'information recueillie en cours de projet;
  - Détailler et analyser ces informations;
  - Procéder aux analyses de nouveaux cas de chargement demandés par la CNESST;
  - Définir différents concepts d'ingénierie utilisés dans l'expertise technique;
  - Monter un rapport résumant nos observations, analyses et conclusions.

## RÉSERVES ET LIMITATIONS

Tout usage ou décision prise par une tierce partie en lien ou basée sur le contenu de ce rapport doit préalablement être approuvé par NadeauSDM. Sans cette approbation écrite, la responsabilité de cet usage ou décision est la responsabilité de cette tierce partie.

Les informations et conclusions dont il est question dans ce rapport sont basées sur la portée du mandat accordé et ne constituent pas un rapport d'expertise détaillé préparé aux fins de résolution d'un litige. L'inspection se limite aux éléments visibles, accessibles et ciblés par le client ou son représentant lors de la visite, une expertise exhaustive de l'ensemble de l'ouvrage n'a pas été faite. L'analyse et les calculs de capacité portante ont été réalisés seulement lorsqu'explicitement mentionnés sur les éléments présentés dans ce rapport.

## DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE

Les analyses présentées sont basées sur les documents et normes de référence suivants :

1. CAN/CSA S269.2-16 – Access scaffolding for construction;
2. CAN/CSA Z797-09 – Règles d'utilisation des échafaudages;
3. CAN/CSA S16-19 – Règles de calcul des charpentes en acier;
4. CAN/CSA-O86-19 – Règles de calcul des charpentes en bois;
5. Plans et devis "Échafaudages d'accès – Lessiveur (échafaudage partiel), localisation 411-017 (arrêt annuel 2021)", révision 1 en date du 28 septembre 2021 par AlumaSafway et approuvé par D [REDACTED] ;
6. Documentation technique
  - "Engineering Manual - Sure Lock Systems scaffolding section 2.1", par AlumaSafway;
  - "Total scaffold System - Product manual\_R\_11.11", par Etobicoke Ironworks Limited;
  - "Saflock System Scaffold - Technical Manual, 2020" Brand Industrial Services, inc, Brand Safway;
  - "Ringlock Technical manual", par At-Pac;
7. Note de calcul " Lessiveur Domtar 2021 " par D [REDACTED] en date de septembre 2021.
8. Photos et vidéos diverses reçues en cours de mandats (revues non exhaustives)

## DÉFINITIONS

**Analyse aux contraintes admissibles (contraintes en service) :** La conception aux contraintes admissibles est une méthode de conception utilisée en ingénierie structurelle. On dimensionne une structure en calculant les contraintes, dans le domaine élastique des matériaux, provoquées par les charges et surcharges maximales prévues et en les comparant avec les contraintes admissibles des matériaux. La contrainte admissible d'un matériau est égale à sa contrainte de rupture divisée par un facteur de sécurité. Bien que cette méthode d'analyse soit encore utilisée dans les ouvrages temporaires, elle a été remplacée par la méthode d'analyse aux états limites lors de la conception de charpente de bâtiments.

**Analyse aux états limites :** La conception à l'état limite fait référence à une méthode de conception utilisée en ingénierie structurelle. Un état limite est une condition d'une structure au-delà de laquelle elle ne remplit plus les critères de conception pertinents. Les facteurs de charge et de résistance sont déterminés à l'aide de statistiques et d'une probabilité de défaillance présélectionnée. La variabilité de la qualité de la construction et la cohérence du matériau de construction sont prises en compte dans les facteurs.

**Charge admissible :** Charge maximale permise à appliquer sur un élément structural.

**Charge morte :** Charge qui est toujours présente sur l'ouvrage et, bien souvent, correspond au poids propre de l'ouvrage.

**Charge totale :** Somme des charges mortes et vives.

**Charge ultime :** Charge qui, lorsqu'appliquée sur un élément structural, provoquera sa rupture.

**Charge vive :** Charge qui est appliquée temporairement et qui peut se déplacer ou changer d'intensité.

**Coefficient de tenue :** Coefficient utilisé avec la méthode d'analyse aux états limites. Ce coefficient permet de prendre en considération la probabilité de rupture des éléments structuraux et est déterminé à l'aide d'études statistiques.

**Connexion encastrée (encastrement) :** Liaison mécanique entre divers éléments structuraux permettant le transfert de charges axiales et de couples.

**Connexion roulée (rotule) :** Liaison mécanique entre divers éléments structuraux permettant le transfert de charges axiales, mais ne transmettant aucun couple.

**Contrainte :** En ingénierie de structure, la contrainte correspond à la charge divisée par la surface sur laquelle elle est appliquée.

**Contreventement :** Système statique destiné à assurer la stabilité globale d'un ouvrage vis-à-vis des charges horizontales. Il sert également à stabiliser localement certaines parties de l'ouvrage (poutres, colonnes) relativement aux phénomènes d'instabilité (flambage ou déversement).

**Diaphragme :** Élément structurel généralement horizontal qui transmet les charges latérales aux éléments résistants verticaux d'une structure (contreventements).

**Facteur de sécurité (FS) :** Facteur utilisé avec la méthode d'analyse aux contraintes admissibles. Il représente la capacité ultime d'un élément structural divisé par la charge qui y est appliquée.

**Kilonewton (kN) :** Unité de mesure de force du Système international, valant 101.97 kg, ou 224.8 lb.

**Kip :** Unité de mesure de masse du Système impérial, valant 1000 lb.

**Longueur effective (KL) :** Valeur modifiée de la longueur d'une membrure, prenant en considération ses conditions de retenue (rotule, encastrement, etc.). La longueur effective est utilisée lors du calcul d'une colonne en compression.

## IDENTIFICATION DES COMPOSANTES

L'échafaudage faisant l'objet de notre expertise a été installé dans l'espace clos du lessiveur de l'usine Domtar. Il s'agit d'une tour d'échafaudage de systèmes à rosette, conçue par Boileau & associés et fournis par AlumaSafway, mesurant environ 39m de haut, comportant 16 niveaux de plancher et composée de planchers en saillie, tels qu'illustrés aux plans et devis en référence.

Afin d'alléger le contenu du rapport, les termes suivants seront utilisés tout au long du rapport pour désigner certaines pièces de l'échafaudage:

DESCRIPTION	ILLUSTRATION
<p><u>Poteau vertical</u> (poteau vertical assurant le support du système à rosette, communément appelé « Standard » ou « Poteau à rosette »)</p>	
<p><u>Barre horizontale</u> (membrure horizontale intérieure simple au système à rosette, communément appelé « Ledger »)</p>	
<p><u>Barre diagonale</u> (membrure diagonale intérieure au système à rosette, communément appelé « Bay Brace »)</p>	
<p><u>Poutrelle simple</u> (membrure horizontale intérieure renforcée pouvant supporter des charges plus élevées que les membrures horizontales simples, communément appelée « Lattice » ou « Truss Ledger »)</p>	
<p><u>Madrier de plancher en acier</u> (Section de plancher amovible en acier, communément appelée « Steel plank »)</p>	
<p><u>Collier de départ</u> (communément appelé « Base collar »)</p>	
<p><u>Manchon de colonne</u> (manchon reliant les colonnes bout à bout, communément appelé « Bouteille »)</p>	

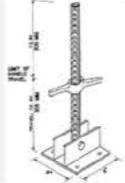
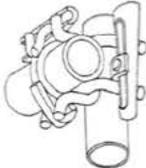
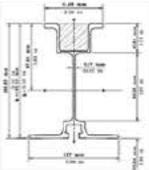
<p><u>Vérin ajustable à pied pivotant</u> (communément appelé « Swivel screwjack »)</p>	
<p><u>Raccords</u></p>	
<p><u>Poutre d'aluminium 6 1/2"</u> (communément appelée « Aluma Beam »)</p>	
<p><u>Connecteurs en V</u></p>	
<p><u>Tuyaux</u> (Tube rond en aluminium ou en acier)</p>	

Tableau 1 - Nomenclature des pièces

## CONTEXTE NORMATIF

La norme S269.2-16 est présentement la référence en termes de conception d'échafaudage dans l'industrie canadienne. Uniquement la section de cette norme traitant des planchers d'échafaudage est citée dans le code pour les travaux de construction, ce qui signifie que l'entièreté de la norme n'a pas force de loi, mais seulement les articles précis concernant le plancher.

Il n'est donc pas obligatoire de s'y conformer dans son entièreté, bien que ce soit bonne pratique de le faire.

## FACTEUR DE SÉCURITÉ

### Norme

La norme S269.2 spécifie que la conception de systèmes d'échafaudages se doit d'être conçue sur la base d'un facteur de sécurité de 4 lorsque la conception est basée sur le calcul des contraintes admissibles. Une analyse aux états limites serait également acceptée.

### Pratique actuelle

On remarque cependant que, dans la pratique actuelle, la vision de chaque concepteur est différente et est toujours fonction des hypothèses qu'il utilise dans sa conception. Deux ingénieurs ayant des hypothèses différentes pourraient tout de même obtenir des niveaux de sécurité similaires.

Un peut avoir des hypothèses très conservatrices, mais juge acceptable (selon son analyse de risque) de diminuer les facteurs de sécurité. Par exemple, considérer une surcharge sur tous les niveaux de l'échafaudage en même temps, tout en utilisant un facteur de sécurité de 3.

Un second concepteur peut utiliser des hypothèses très limitatives et restrictives, mais justifie l'utilisation d'un facteur de sécurité de 4. Par exemple, considérer une surcharge maximale de 10 travailleurs, en contrôlant l'accès à l'échafaudage, tout en utilisant un facteur de sécurité de 4.

Les différentes approches de ces deux concepteurs, bien que leur facteur de sécurité soit différent, peuvent mener à des charges de conception plutôt similaires, malgré les différents intrants.

## SITUATION À L'EFFONDREMENT

En plus des dommages aux équipements survenus lors de l'effondrement, lors de l'intervention de sauvetage, la majeure partie des composantes de l'échafaudage ont été retirées pour permettre l'évacuation des travailleurs étant restés coincés.

D'après les informations transmises, l'érection de l'échafaudage était pratiquement complétée, mais n'était pas encore attestée pour en donner accès aux autres quarts de métier. Le niveau supérieur, soit le 16<sup>e</sup>, était accessible par les monteurs.

Un certain nombre de tamis au niveau 2 étaient ouverts, ce qui confirme que les travaux de maintenance du lessiveur étaient déjà en cours avant l'effondrement.

À l'effondrement, [REDACTED] se trouvaient dans la partie haute (niveaux 10 à 16). [REDACTED] autres travailleurs se trouvaient dans la partie basse, dont [REDACTED] au niveau 7.

L'effondrement de l'échafaudage a causé un encombrement entre les niveaux 3 et 7.

À la suite de l'effondrement, les sauveteurs ont retiré les échafaudages dans le but d'atteindre les travailleurs se trouvant dans la partie basse. L'opération prenait origine aux niveaux supérieurs du lessiveur et consistait à retirer tous les éléments d'échafaudage en se déplaçant vers le bas. Par contre, beaucoup d'équipements ont été coupés et/ou endommagés durant le processus.

L'accès au lessiveur nous étant interdit, le relevé de l'intérieur a été fait à l'aide d'un drone. Les [REDACTED] travailleurs qui se trouvaient au niveau 7 pesaient environ 90 kg (198 lb) chacun, incluant leurs outils.

Il a été convenu que, lorsque nous faisons référence dans ce rapport à un étage, il s'agit de l'étage du bâtiment adjacent au lessiveur alors que, lorsqu'il s'agit d'un niveau, cela correspond au niveau de plancher de l'échafaudage. Les étages et niveaux sont, tous deux, indiqués aux plans et devis de l'échafaudage mentionnés en référence.

# OBSERVATIONS/FAITS RAPPORTÉS ET ANALYSES GÉNÉRALES

La section suivante présente un résumé des principaux faits et observations relevés au cours de l'expertise technique menée, en plus des faits rapportés par la CNESST ou autres intervenants au dossier, du traitement des données et de la revue des documents mis à notre disposition. Le tout est alors analysé et fera l'objet de discussions, notamment :

- Hypothèses de conception limitatives (laissant peu de marge à l'erreur);
- Absence d'exigences de capacité minimale des équipements;
- Présence d'équipements de différents fournisseurs/manufacturiers;
- Masse de l'échafaudage sous-estimée;
- Appui vertical à la base surchargé;
- Manque d'encastrement aux butées latérales;
- Hypothèses de calcul erronées quant à la retenue latérale des poteaux verticaux;
- Absence d'analyse de l'interaction flexion/compression des poteaux aux appuis des planchers en saillie.

## HYPOTHÈSES DE CONCEPTION

### Observations

Aucune norme de conception n'a été citée aux plans et devis, ce qui porte à croire que D n'affirme pas s'être conformé à la norme S269.2, sans toutefois affirmer le contraire.

On y trouve cependant une annotation qui spécifie le facteur de sécurité utilisé pour la conception des composantes principales du système (voir Figure 1), ainsi qu'une charge de conception de 25 lb/pi<sup>2</sup>, tout en limitant l'accès à 10 personnes.

#### FACTEUR DE SÉCURITÉ

- MEMBRURE HORIZONTALE : F.S. >= 2.2
- MEMBRURE VERTICALE : F.S. >= 3.0
- TUBE & RACCORDS : F.S. >= 2.5

#### CHARGE

- CHARGE MAXIMUM PERMISE SUR LES PLATE-FORMES DE TRAVAIL :  
25 LB/PI<sup>2</sup> - 10 PERSONNES DANS LE VASE CLOS EN MÊME TEMPS MAX.

Figure 1 - Hypothèses de conception

Aux notes de calculs de M. D, on constate que la charge répartie de 25 lb/pi<sup>2</sup> a été omise dans l'analyse, tandis que le poids de 10 ouvriers, estimé à 250 lb, a été réparti également entre les 4 poteaux verticaux.



Figure 2 - Répartition des charges

### Commentaires

Dans ses hypothèses de calcul, D a combiné une limitation de charge, qui inclut un maximum de 10 personnes dans l'échafaudage, ainsi que des facteurs de sécurité réduits de 3 au lieu de 4 (pour les poteaux verticaux). La combinaison de ces hypothèses laisse très peu de marge de manœuvre.

De plus, sans l'utilisation de conjonctions de coordination « ou » sur les hypothèses de chargement inscrites aux plans, les annotations sur la charge vive de 25 lb/pi<sup>2</sup>, utilisées conjointement à la limitation de 10 ouvriers, laissent croire qu'il devient acceptable de procéder à l'entreposage léger d'équipements (tels que les outils à main et la boulonnerie nécessaires aux opérations prévues de maintenance), pour autant que la charge vive surfacique totale n'excède pas le 25 lb/pi<sup>2</sup> prescrit. On

voit cependant que, dans sa note de calcul ( ), D n'a pas considéré ces deux charges comme étant concomitantes. On devrait retrouver des limitations de surcharge supplémentaires aux plans et devis afin de correspondre aux analyses démontrées sur les notes de calcul.

La charge de 2500 lb, correspondant à 10 ouvriers, a été répartie également entre les 4 poteaux. Il est fort probable que plusieurs travailleurs se retrouveront simultanément au-dessus d'un seul de ces poteaux. La charge vive des 10 travailleurs aurait donc dû être considérée sécuritairement sur un seul poteau vertical.

## ÉQUIPEMENTS UTILISÉS

### Observations

Le plan de l'échafaudage présente une seule hypothèse sur l'identification des composantes prévues par D . L'annotation de la Figure 3 est la seule indication qui précise que les poteaux doivent être du système « Sure Lock ».



Figure 3 - Extrait des plans, poteau « Sure Lock »

Nos relevés dans les décombres nous ont permis de constater que plusieurs pièces de fabricants et de distributeurs différents ont été installées sur cet échafaudage. Le tableau ci-dessous présente certaines identifications de fabricants et de distributeurs que nous avons trouvées pendant cette phase.

<b>FABRICANT / DISTRIBUTEUR</b>	<b>PHOTO IDENTIFICATION</b>
<u>Scafom Rux</u>	
<u>Sure Lock</u>	
<u>Safway</u>	
<u>At-Pac</u>	



Tableau 2 - Identification de fournisseurs / distributeurs

Bon nombre de composants présents dans les décombres ne pouvaient être identifiés adéquatement. Soit les inscriptions étaient illisibles, soit les pièces ne possédaient aucune identification évidente.

L'annotation au plancher de transition « DL10 » (voir Figure 4) précise que les poutrelles simples se doivent d'être des « DL10 ». Cependant, cette annotation ne fait directement référence à aucun code de produit « Sure Lock », que ce soit dans le manuel d'ingénierie du fournisseur, ou dans la liste d'équipements reçue (voir ANNEXE 2 - Liste des équipements reçus). Pour cela, il devient nécessaire d'interpréter l'annotation « DL 10 » comme étant un « double ledger de 10 pi », ce qui correspond à une poutrelle simple, dont la capacité nominale reste indéterminée.

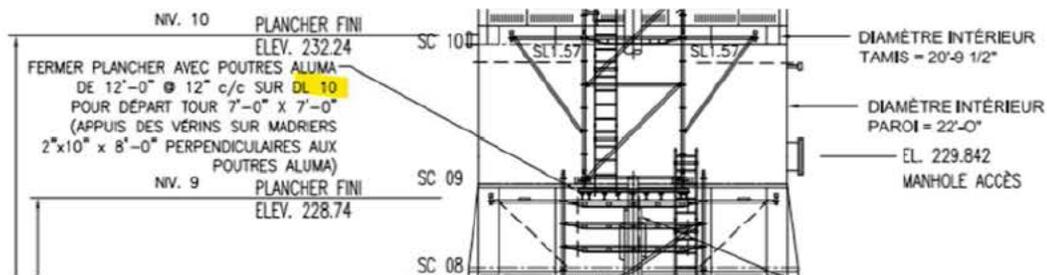


Figure 4 - Extrait des plans, identification DL10

Par ailleurs, nos recherches sur le site web de AlumaSafway nous ont permis de trouver la poutrelle simple du système « Sure Lock » de AlumaSafway (voir Figure 5). Nous constatons que les codes de produit ne correspondent pas à l'identification au plan.

**Sure Lock**

Double longeron d'échafaudage	Article N°	Poids	Taille
Double longeron d'échafaudage Sure Lock De 3,05 m (10 pi)	SLDH10	18,7 kg/41,1 lb	3000 mm/118,1 po
Double longeron d'échafaudage Sure Lock De 2,13 m (7 pi)	SLDH70	13,3 kg/29,4 lb	2085 mm/82,1 po

Utilisation:  
Conçu pour une charge de 50 PSF dans des travées de 2,13 m et de 3,05 m.



Figure 5 - Poutrelle simple « Sure Lock »

Les figures (Figure 6) et (Figure 7) présente un échantillonnage de différentes poutrelles simples que nous avons trouvées dans les décombres.

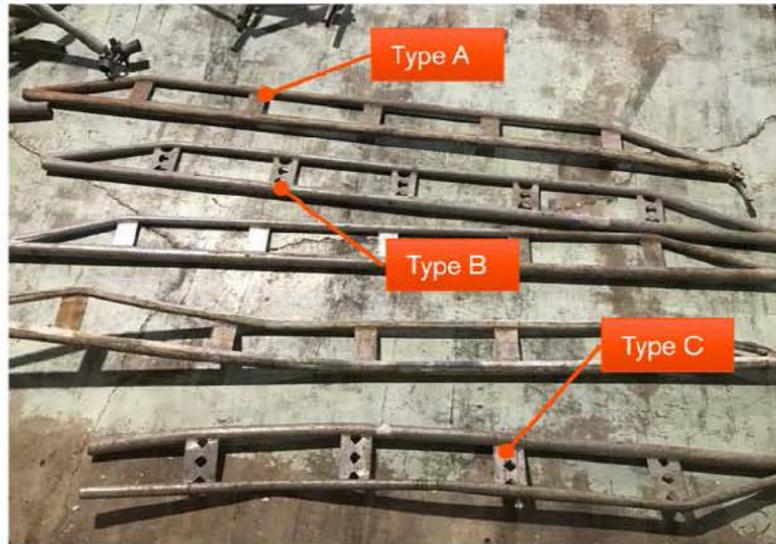


Figure 6 - Photo modèles de poutrelles simples

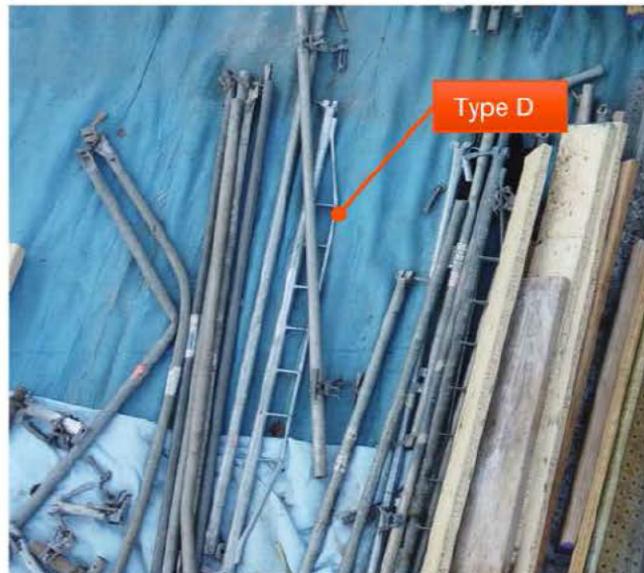


Figure 7 - Photo modèles de poutrelles simples

Nous avons également noté que dans la note de calcul du [redacted] celui-ci a basé ses analyses uniquement sur les capacités admissibles des équipements de marque « Sure lock » de AlumaSafway. Il ne semble pas tenir compte dans son analyse de la présence d'autres marques ou modèles de pièces, ce qui est contradictoire à ce que nous avons constaté dans les décombres.

### Commentaires

Il existe un nombre important de manufacturiers et de distributeurs. Il existe autant de capacités nominales de poutrelle simple, ou autre équipement, que de modèles sur le marché, ce qui rend difficile l'attribution d'une capacité exigée aux plans des différentes composantes de l'échafaudage. Une annotation claire aux notes générales aurait pu éliminer cette ambiguïté.

Il est important de noter que les capacités varient d'un manufacturier à l'autre. En prenant le simple comparatif de la capacité de 4 éléments différents relevés entre le guide technique du « Sure Lock » et celui de 2 fournisseurs / manufacturiers Safway et At-Pac (manuels comparatifs), voir documents en référence, nous constatons des différences, à la hausse comme à la baisse, entre les charges admissibles de ces composantes spécifiques (voir Tableau 3).

COMPOSANTE	PRÉCISIONS	UNITÉ	SURE LOCK	SAFWAY (% DIFF.)	AT-PAC (% DIFF.)
Poteau vertical	Charge axiale; poteau contreventé à 2.0m; aucune charge horizontale	lb	4500	4500 (0%)	4710 (+4.5%)
Barre horizontale (10pi)	En flexion; charge uniformément répartie	lb / ft	70	50 (-28.5%)	62.5 (-10.7%)
Barre diagonale (7pi x 2.0m)	Charge axiale	lb	765	420 (-45.1%)	608 (-20.5%)
Poutrelle simple (10pi)	En flexion; charge uniformément répartie	lb / ft	227	367 (+61.7%)	191 (-15.9%)

Tableau 3 - Comparatifs de la charge admissible d'équipements

FS 4 :1; réf.: "Saflock System Scaffold - Technical Manual, 2020" Brand Industrial Services, inc, Brand Safway, "Engineering Manual - Sure Lock Systems scaffolding section 2.1", AlumaSafway et "Ringlock Technical manual", At-Pac

De plus, il n'est pas garanti que tous ces équipements soient parfaitement compatibles entre eux, tout en conservant leur pleine capacité. Leur divergence dans le tolérancement de fabrication peut également affecter la configuration générale ou la planéité verticale de l'échafaudage, d'où la possibilité de retrouver des composantes plus longue ou plus courte selon le manufacturier. Ainsi, il est préférable pour un entrepreneur spécialisé en échafaudage d'utiliser les équipements provenant d'un seul manufacturier. La réalité du marché étant ce qu'elle est, un concepteur se doit de considérer l'ensemble de ces facteurs dans ses analyses où il est recommandé d'utiliser des valeurs de capacité conservatives et d'indiquer clairement ses hypothèses aux plans. L'exemple précédent démontre que certaines pièces d'échafaudage de fournisseurs / manufacturiers différents puissent avoir des capacités plus faibles que celles du système « Sure lock », où D ne semble pas avoir tenu compte de ce facteur dans ses calculs.

Comme la capacité admissible des poteaux verticaux (éléments principaux qui seront analysés plus loin dans la section « Analyses structurales par logiciel ») est généralement similaire d'un fournisseur / manufacturier à l'autre, nous sommes d'avis que l'utilisation de plusieurs fournisseurs / manufacturiers sur cet échafaudage n'a pas joué un rôle important sur son effondrement.

## MASSE DE L'ÉCHAFAUDAGE

### Observations

Aux notes de calcul rédigées par D, la masse totale de l'échafaudage a été estimée 35 911 lb (160 kN) (voir Figure 8).



Figure 8 - Extrait de la note de calcul, estimation de la masse de l'échafaudage par D

### Faits rapportés

Des décombres, l'ensemble des composantes, pièces et matériaux qui composaient et étaient sur l'échafaudage au moment où celui-ci s'est effondré a été pesé. Selon les informations obtenues, il y avait 45 008 lb (200.3 kN) en équipements composant l'échafaudage, d'où une réaction estimée à 11 252 lb (50.1 kN) par appui à la base du lessiveur.

## Analyses

Nous avons estimé, à partir des plans émis pour construction, la masse des matériaux composant l'échafaudage à 42 007lbs (187 kN), (voir annexe 1 pour les détails de cette estimation). L'estimation ayant été réalisée à partir d'un relevé manuel de quantité des constituants principaux de l'échafaudage, nous avons prévu un 10% additionnel qui fait office de contingences pour couvrir l'ensemble des équipements difficilement quantifiables, tels que les composants additionnels nécessaires à la sécurisation des lieux (garde-corps, trappes d'accès, étanchéité des planchers, raccords additionnels non comptabilisés) et autres aléas de chantier. Cette contingence de 10% découle de nos années d'expériences pour la réalisation de relevés de quantité sur des systèmes d'échafaudage où nous prévoyons sécuritairement une surestimation des quantités pour couvrir les erreurs de compte ou les oublis de certaines pièces ou matériaux. Le ratio hauteur-largeur étant élevé sur cet échafaudage, l'impact d'une sous-estimation de la charge morte ne laisse aucune place à l'erreur.

## Commentaires

La masse totale estimée par **D** de 35 911 lb (160 kN) se rapproche de notre estimation théorique de 36 394 lb (162 kN) des constituants principaux de l'échafaudage, avant majoration (pour inclure le bois et les accessoires de contingences difficilement quantifiables). L'écart de la valeur du **D** par rapport à la masse réelle mesurée en chantier est de 25.3%.

Nous notons également que **D** limitait le nombre maximum d'ouvriers sur l'échafaudage à 10, pour un total théorique équivalent de 2500 lb (11 kN), ce qui représente seulement 7% de la masse totale estimée par **D**, ne laissant ainsi aucune marge de manœuvre sur les aléas de chantier.

La masse de l'échafaudage ayant été sous-estimée, ce facteur peut avoir joué un rôle important dans l'effondrement.

## APPUI VERTICAL À LA BASE

### Observations

Le détail des assises de l'échafaudage aux plans fait état d'appui sur vérins ajustables à pied pivotant (Figure 9), (Figure 10) et (Figure 11). Si l'on se base sur la simple interprétation des données techniques du système « Sure Lock », la charge admissible d'un vérin ajustable à pied pivotant dont l'extension est de 300mm serait limitée à 2500 lb, incluant une diminution de facteur de sécurité à 4:1, ce qui correspond à une charge ultime de 10 000 lb (45 kN).

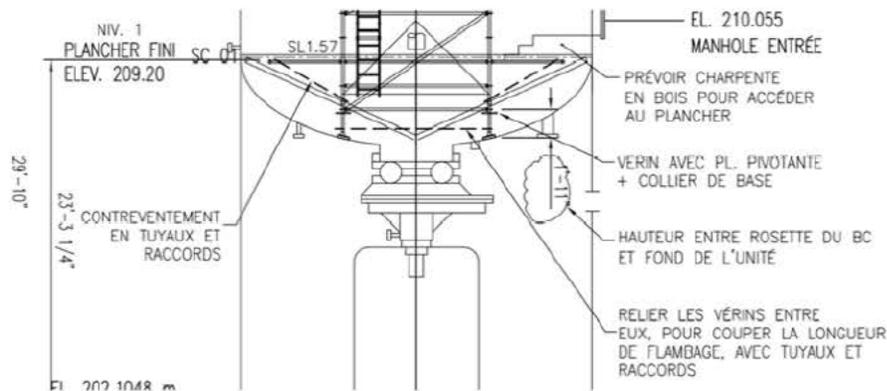
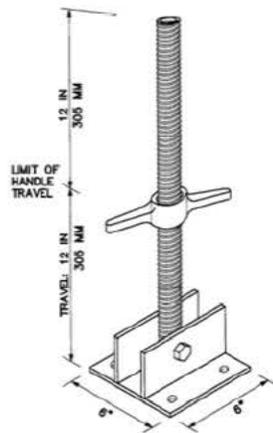


Figure 9 - Extrait des plans, appui à la base

Sure Lock Swivel Base Jack – Structural Properties



Standard Length		Part No
Imperial	Metric	
24 in	0.47m	13011

Safe Working Loads

F.S. = 4:1		F.S. = 3:1		F.S. = 2.5:1	
lb	kg	lb	kg	lb	kg
2500	1134	3400	1542	4000	1814

Figure 10 - Vérins ajustables à pied pivotant



Figure 11 - Photo du vérin

**Commentaires**

La charge morte réelle de 11 252 lb (50 kN) à elle seule excède de 12% la charge ultime du vérin de 10 000 lb (45 kN) selon cette même charte. La valeur équivalente par appui estimée par D [redacted] est de 8 978 lb (40 kN), soit 11% en-dessous de la valeur théorique de rupture de ce même vérin, ce qui correspond à un facteur de sécurité de 1,11.

Le facteur de sécurité est largement insuffisant, même en utilisant la charge morte estimée par D [redacted]. Notons ici que l'ajout de charge vive sur l'échafaudage diminuerait davantage ce facteur de sécurité.

Par contre, la base de la structure étant restée intacte après l'effondrement, nous pouvons éliminer ce facteur dans les causes de l'effondrement.

**PLANCHER DE TRANSITION**

**Observations**

Puisque le diamètre intérieur du lessiveur diminue près du niveau 9, l'échafaudage au-dessus de ce niveau a été conçu en respectant une distance de 7'-0" (2.13m) entre les poteaux verticaux. Cet espacement est de 10'-0" (3.048m) aux niveaux inférieurs à 9.

Un plancher de transition, composé de poutres d'aluminium et d'un assemblage de poutrelles simples reliés à l'aide de tuyaux et de raccords, a été spécifié. Il sert de système structural de transition entre les 2 différentes configurations (voir Figure 12).

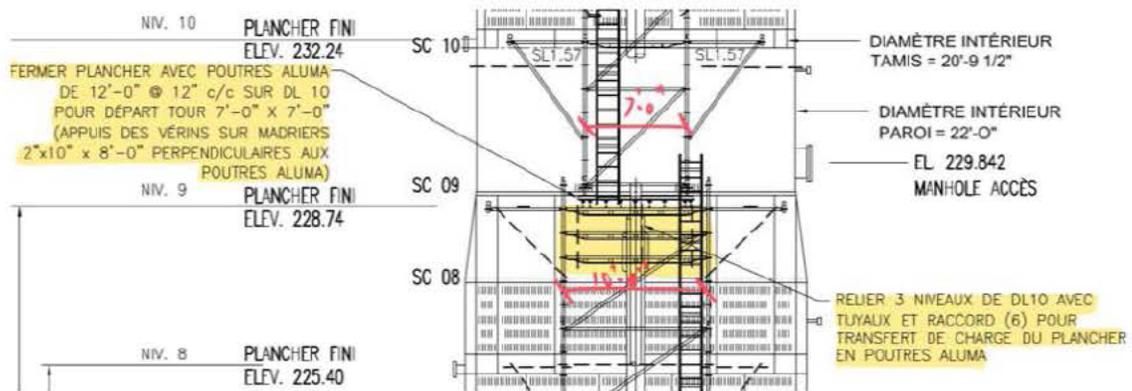


Figure 12 - Extrait des plans, plancher de transition

L'assemblage de tuyaux et de raccords a comme fonction de rendre solidaires les trois poutrelles simples adjacentes. La localisation des tuyaux raccord en plus des détails de fixation n'y sont pas précisés.

### Analyses

Ces tuyaux sont excentrés par rapport au centre axe des poutrelles simples, puisqu'ils sont connectés sur le côté (voir Figure 13).

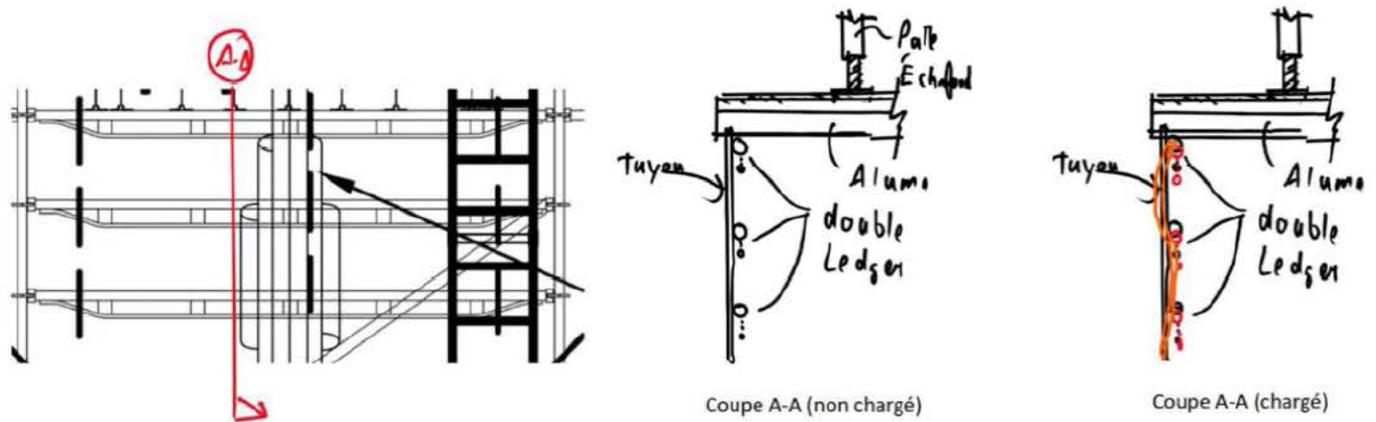


Figure 13 - Comportement poutrelles simples

Cette excentricité amène ce qu'on pourrait appeler une perte de rigidité au niveau de la connexion, ce qui tend à solliciter le tuyau vertical non seulement en compression, mais aussi en flexion. À la coupe A-A (chargé), on illustre la déformation du système lorsqu'il est chargé. Ce phénomène fait en sorte que la poutrelle simple localisée au rang supérieur reprendra forcément plus de charge que les poutrelles sous-adjacentes. D'après la note de calcul du [redacted] (voir ANNEXE 3 - [redacted]), ce phénomène n'a pas été pris en considération.

### Commentaires

Cet assemblage est peu détaillé par rapport à son importance, puisqu'il s'agit d'un élément au travers duquel toutes les charges provenant de la partie supérieure de l'échafaudage sont transférées à la partie inférieure. Nous aurions souhaité être en mesure de confirmer, à l'aide des plans et devis, la localisation précise des tuyaux, soit l'espacement c/c entre les différents éléments et composants, ainsi que les détails de fixation des raccords, soit sur la corde inférieure ou supérieure de chaque poutrelle simple.

Son montage peut donc varier en fonction de l'interprétation qu'en font les travailleurs sur le chantier. Comme nous l'avons mentionné au point « Équipements utilisés », plusieurs modèles différents de poutrelles simples ont été trouvés dans les

décombres. Considérant ceci, il devient fort plausible que l'assemblage de cet élément puisse avoir été réalisé arbitrairement avec des composantes de capacité différente.

Après analyse, nous ne pensons pas que la structure du plancher de transition ait joué un rôle prédominant dans l'effondrement.

## STABILISATION LATÉRALE EXTERNE

### Observations

La tour est stabilisée latéralement par des butées en tuyaux appuyés aux parois du lessiveur à chaque 30'-0" (9.14m) pour la section sous le niveau 9 (baies de 10' x 10', voir Figure 14), et à tous les 20'-0" (6.10m) pour la section au-dessus du niveau 9 (baies de 7' x 7', voir Figure 15). Selon l'article 7.7.2 de la norme S269.2-16, un espacement maximal de 30'-0" (9.14m) entre les butées latérales est requis pour une baie de 10' x 10', alors qu'un espacement maximal de 21'-0" (6.40m) serait pour une baie de 7'x7', ce qui correspond au standard prescrit aux plans.

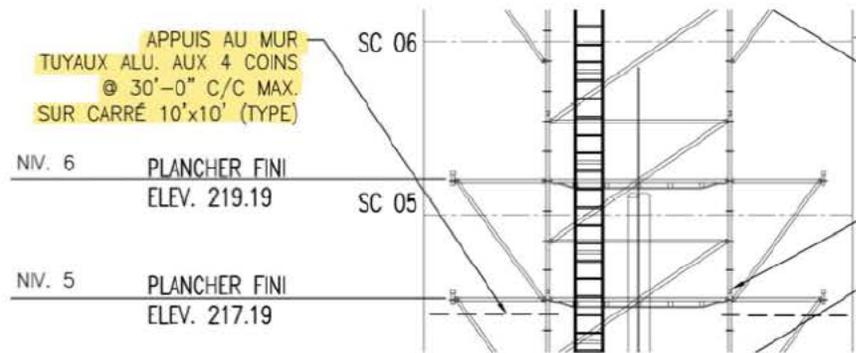


Figure 14 - Extrait des plans, stabilisation latérale - (Baie 10' x 10')

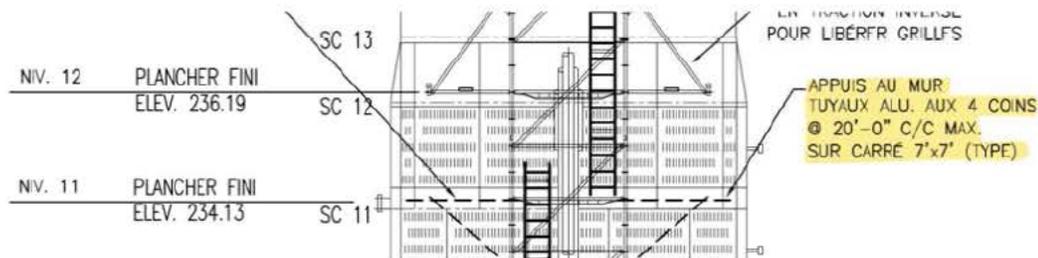


Figure 15 - Extrait des plans, stabilisation latérale - (Baie 7' x 7')

Nous notons toutefois une perte de continuité sur la stabilisation latérale extérieure au niveau du plancher de transition. Le dernier contreventement extérieur de la section sous le plancher de transition se situe à  $\pm 20'-6''$  (6.25m) plus bas, tandis que le premier contreventement extérieur au-dessus du plancher de transition se retrouve à  $\pm 9'-0''$  (2.75m). Il en résulte un secteur où la longueur non supportée totale est de  $\pm 29'-0''$  (8.84m), pour un secteur de changement de configuration d'échafaudage où aucune annotation de stabilité ou de retenue particulière n'est spécifiée aux plans (voir Figure 16).

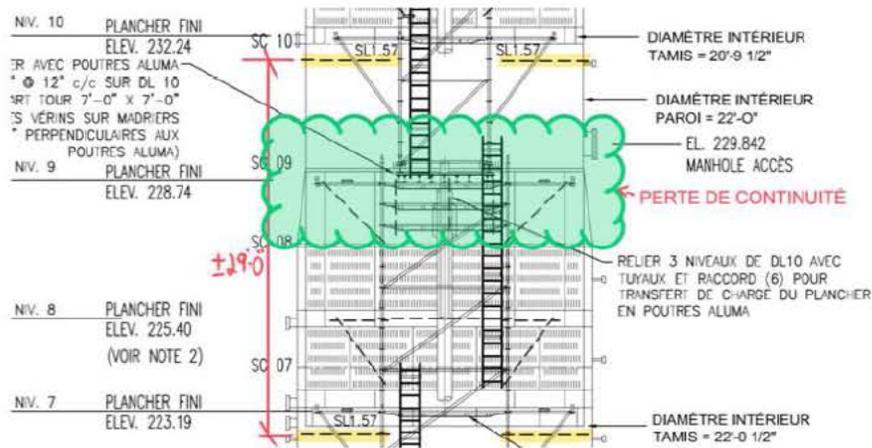


Figure 16 - Extrait des plans, contreventement plancher transition

Les tuyaux servant de butées sont fixés à l'aide d'un raccord à un seul poteau vertical, c'est-à-dire que le tuyau n'est pas continué à l'intérieur de l'échafaudage en guise d'encastrement.

### Commentaires

Des tuyaux utilisés comme butées se poursuivent habituellement à l'intérieur des échafaudages, de manière à se connecter à deux poteaux verticaux (voir Figure 17). De cette manière, les tuyaux sont encastres rigidement au niveau de l'échafaudage et ne sont plus libres de pivoter.

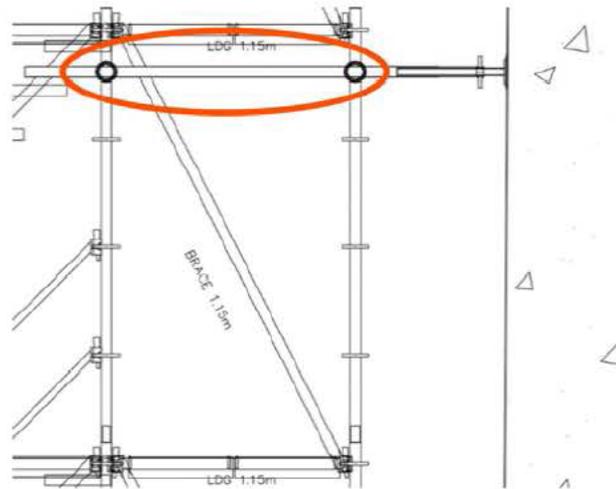


Figure 17 - Exemple d'encastrement de butées

La perte de continuité du niveau 9 de l'échafaudage nous pousse à conclure que **D** aurait dû y prévoir des butées latérales supplémentaires ou, du moins, diminuer l'espacement entre les butées de la partie inférieure et supérieure de l'échafaudage. Une instabilité latérale près du plancher de transition pourrait survenir sans cet ajout.

La stabilité globale de la tour d'échafaudage est assurée par le système de butées latérales extérieures. Or, chaque butée est fixée par un raccord sur un seul poteau vertical. La logique laisse croire que s'ils sont installés perpendiculairement à la face du réservoir et s'ils sont parfaitement alignés les uns par rapport aux autres, ils formeront un système de contreventement extérieur efficace. La réalité de chantier est souvent différente de la théorie et le risque que leur positionnement ne soit pas parfait se doit d'être envisagé. L'ajout d'un blocage latéral à l'extrémité des tuyaux permettrait de diminuer considérablement les aléas de chantier et éliminerait le fait que la capacité des butées ne soit contrôlée par la résistance du couple maximal en rotation du raccord à connexion du poteau vertical.

Outre la spécification aux plans sur le « tuyaux aux 4 coins » et son espacement maximal toléré, nous ne notons aucune restriction spécifique sur la localisation de ces butées. De notre compréhension, pour autant que l'espacement maximal soit

respecté, les tuyaux peuvent être installés aléatoirement sur l'échafaudage, sans égard à limiter la flexion horizontale des poteaux ou sans assurer un transfert de charge efficace de cette butée vers le cœur de la structure de l'échafaudage. Notons par ailleurs que l'article 7.7.4.2 de la norme S269.2 exige que les contreventements latéraux internes soient placés aux niveaux auxquels des supports externes sont requis. Il aurait été nécessaire de préciser, aux plans et devis, que ces butées latérales doivent concorder avec des nœuds contreventés.

L'absence d'encastrement sur des butées latérales et le manque de butées près du plancher de transition pourraient être suffisants pour permettre une instabilité globale de l'échafaudage, initiant ainsi un mouvement horizontal. L'échafaudage ayant été démantelé, il devient impossible de confirmer si cet aspect a eu un impact sur l'effondrement. Nous croyons que ce facteur ne fait pas partie des causes principales de l'effondrement, puisqu'un mouvement horizontal global de l'échafaudage risquerait de se limiter à des dommages mineurs, étant donné que cet échafaudage est confiné à l'intérieur du lessiveur. Cependant, combiné à un manque de capacité portante de certains équipements, ce déplacement horizontal pourrait les surcharger davantage, contribuant ainsi à l'effondrement, sans en être la cause prédominante.

## CONTREVENTEMENTS INTERNES

### Observations

Nous notons que la longueur non supportée des poteaux (distance centre/centre entre les supports latéraux) considérée sur la note de calcul de **D** est de 1,5m (4'-11") (voir Figure 18), correspondant à une charge admissible de 8 kip (8000 lb / 35.6 kN) pour un facteur de sécurité de 2.5, d'après le diagramme montré en Figure 19. Cette longueur entre les supports latéraux est justifiée par la note « à cause des planchers et des membrures de contreventement ».



Figure 18 - Extrait de la note de calcul, capacité des poteaux verticaux

**FIGURE 2**  
**INTERACTION DIAGRAM: AXIAL LOAD + SECONDARY BENDING**  
**SURE LOCK VERTICAL STANDARD**  
 NOMINAL FACTOR OF SAFETY (F.S.) 3.1



SureLock Systems Scaffold  
Page 10

**AlumaSystems**  
28MAR97

Volume 2  
Section 2.1

*Figure 19 - Diagramme d'interaction « Sure Lock »*

### Analyses

Aux plans et devis, on voit qu'aucun plancher n'est prévu entre les niveaux 6 et 7 (voir Figure 20). Les poteaux y sont visiblement non contreventés sur une longueur de 2m (6'-7"). Entre les niveaux 4 et 6, les planchers identifiés en vert sur les images suivantes ont été considérés comme des stabilisations latérales par **D** [REDACTED]. Les membrures de plancher agissent plutôt comme lien rendant solidaires les différents poteaux. Sans contreventement agissant comme « barrure », il ne s'agit pas d'une stabilisation latérale efficace d'une colonne. En cas d'effondrement, il y aurait plutôt un effet domino puisque les poteaux seront solidaires. Bien que cet élément ajoute un peu de redondance dans le système, une distance entre les contreventements de 2m aurait dû être considérée, ce qui obligerait à considérer une capacité de poteau vertical de 5.59 kip (5900lb / 24.9 kN) au lieu de 8.0 kip (8000 lb / 35.6 kN), soit une réduction de 26%.

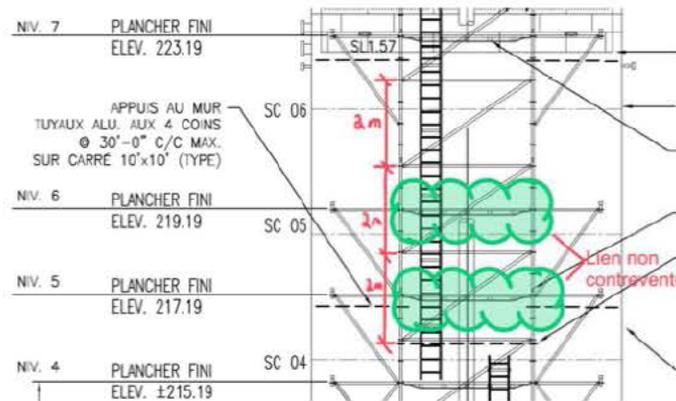


Figure 20 - Extrait des plans, contreventements intérieurs

### Commentaires

Le fait que l'installation consiste en une tour isolée sur 4 poteaux, chaque nœud qui limite la longueur non supportée des poteaux verticaux se doit d'être retenu, pour chacun des axes, par une barre horizontale et par une barre diagonale. Le but est d'assurer un transfert adéquat des efforts intérieurs à l'échafaudage, sans induire de flexion aux poteaux de support, à moins d'avoir prévu un système de contreventement indépendant ou équivalent. Ce n'est pas le cas ici.

Notons toutefois que la longueur non supportée prévue au plan et celle réalisée en chantier sont contradictoires à ce que fait état la note de calcul reçue, où il est énoncé une capacité basée sur une longueur non supportée de 1,5m plutôt que sur une longueur supportée de 2,0m comme nous avons constaté aux plans et devis ainsi qu'en chantier. Cet élément a un impact majeur sur la charge admissible sur un poteau vertical par rapport aux calculs fournis par D [redacted]

## PLANCHERS EN SAILLIE

### Observations

À chaque niveau comportant un plancher fini, on y retrouve en périphérie de la tour un plancher en saillie. Il s'agit d'une extension de plancher permettant aux ouvriers de travailler près des parois intérieures du lessiveur.

Les planchers en saillie sont supportés par 2 configurations distinctes. La première n'est pas directement annotée et détaillée aux plans, mais nous pouvons en déduire qu'elle est composée de barres diagonales, de colliers de départ, de barrures horizontales et de madriers de plancher en acier (ou en bois, voir Figure 21).

La deuxième est composée d'un assemblage de tuyaux et de raccords dimensionnellement et quantitativement non définis aux plans (voir Figure 22).

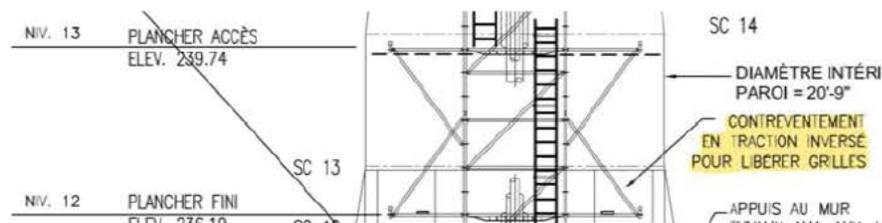


Figure 21 - Extrait des plans, plancher en saillie typique

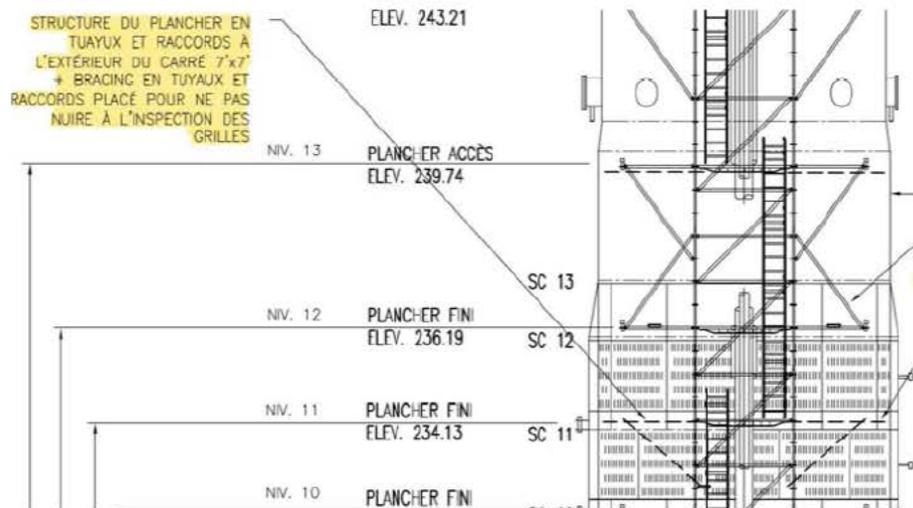


Figure 22 - Extrait des plans, plancher en saillie (ass. tuyaux et raccords)

Pour chacune des configurations, la barre diagonale (1<sup>re</sup> configuration) ou le tuyau oblique (2<sup>e</sup> configuration) travaille en compression ou en tension et se connecte aux poteaux verticaux.

À la connexion de la diagonale au poteau vertical, on retrouve par endroits (voir élément encerclé au niveau 5 de la Figure 23) des membrures horizontales reliant les quatre poteaux verticaux. Le plancher en saillie du niveau 7 n'a pas de membrure reliant l'appui des diagonales.

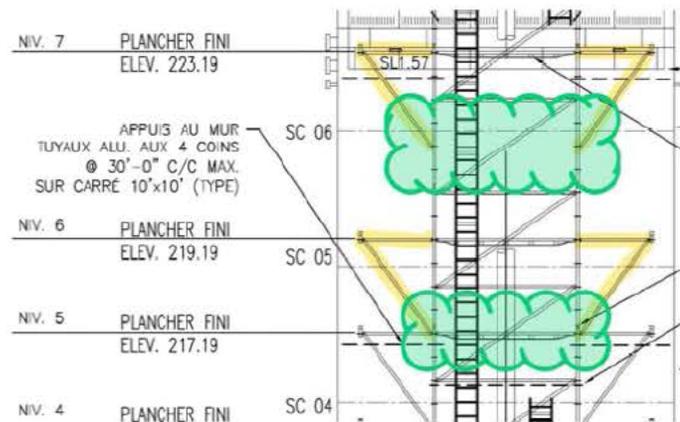


Figure 23 - Extrait des plans, appui des planchers en saillie

Cette configuration a comme effet de solliciter les poteaux à la fois en compression et en flexion. La note de calcul préparée par D [redacted] ne présente aucune analyse des colonnes sollicitées en compression/flexion.

### Commentaires

L'interaction entre les charges axiales et latérales sur les poteaux verticaux dépasse, à première vue, les charges admissibles de ces équipements. Une analyse de cette configuration est détaillée dans la section « Analyses structurales par logiciel » de ce rapport.

L'absence d'une analyse de ce comportement aux notes de calcul constitue un manquement majeur dans cette conception.

Il est possible d'éviter de solliciter les poteaux verticaux en flexion en modifiant légèrement la structure. Par exemple, appuyer les membrures obliques sur un nœud stabilisé latéralement par les contreventements (voir Figure 24) est une option à considérer pour y parvenir.

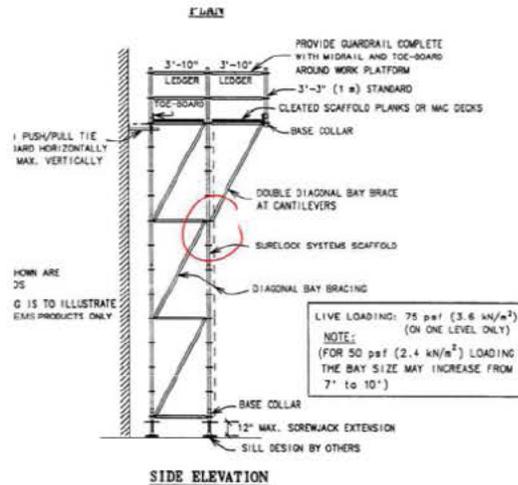


Figure 24 - Exemple membrure oblique

## MONTAGE/INSTALLATION

L'accès au lessiveur nous étant interdit, le relevé de l'intérieur a été fait à l'aide d'un drone. L'analyse des vidéos issues de ce relevé nous a permis de soulever certaines incohérences entre les plans émis pour construction et l'installation réalisée en chantier, telles que :

- L'absence de tuyau stabilisant l'appui vertical à la base;
- La perte de continuité des contreventements;
- Le manque de concordance quant à la localisation des contreventements entre les plans et devis et l'échafaudage construit;
- L'appui des diagonales des planchers en saillie possiblement positionnés de manière aléatoire.

## APPUI VERTICAL À LA BASE

### Observations

Les tuyaux servant à bloquer le flambage à la base des vérins ajustables à pied pivotant (se référer à la Figure 9) n'ont pas été installés tel que spécifié aux plans (Figure 25 et Figure 26).



Figure 25 - Appui #1 sans tuyau (Drone)



Figure 26 - Appui #2 sans tuyau (Drone)

### Commentaires

Cet appui est important puisqu'il veille à ce que les charges dans le vérin soient en compression seulement. La base du lessiveur comporte une légère pente et induirait une réaction avec une composante horizontale qui, sans la présence des blocages en flambage, induirait un moment en flexion.

Puisque cette partie de l'échafaudage était intacte à la suite de l'effondrement, l'absence du blocage en flambage ne semble pas avoir joué de rôle dans son effondrement.

## CONTREVENTEMENTS INTERNES

### Observations

Les lignes pointillées sur les photographies qui suivent désignent les emplacements où nous nous serions attendus à voir des contreventements selon les plans et devis de l'échafaudage.

La Figure 28 montre une perte de continuité dans l'installation des barres diagonales servant à contreventer le cœur de la section centrale de l'échafaudage près du niveau 1 (voir Figure 27).

Selon le plan de l'échafaudage, nous devrions retrouver une continuité dans la mise en place des barres diagonales. Une barre diagonale devrait être présente à chaque 4 niveaux, soit à tous les 2 m de hauteur (dans un sens ou dans l'autre). Cela étant, nous devrions retrouver sur le plan vertical (délimité par les nœuds 1A et 2A de la Figure 28) une barre diagonale représentée par l'une ou l'autre des lignes bleues pointillées. Au même titre, nous devrions retrouver une barre diagonale représentée par l'une ou l'autre des lignes vertes pointillées du plan vertical (délimité par les nœuds 1A et 4A).

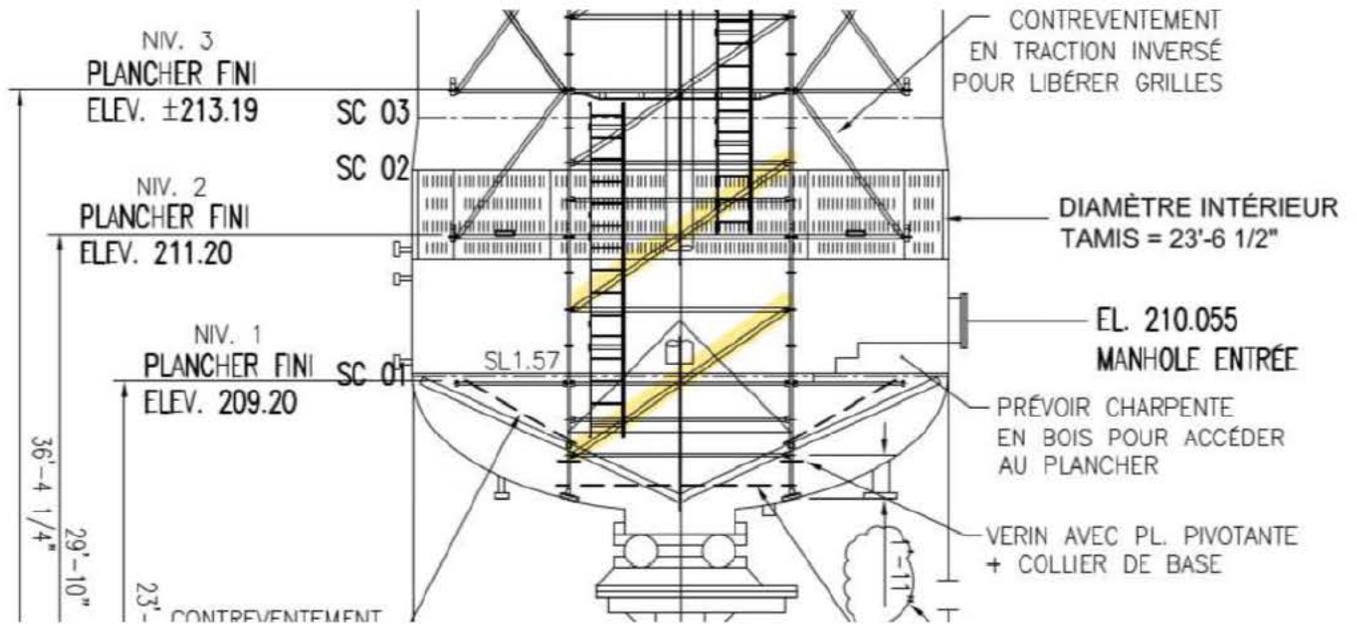


Figure 27 - Extrait des plans, identification des contreventements

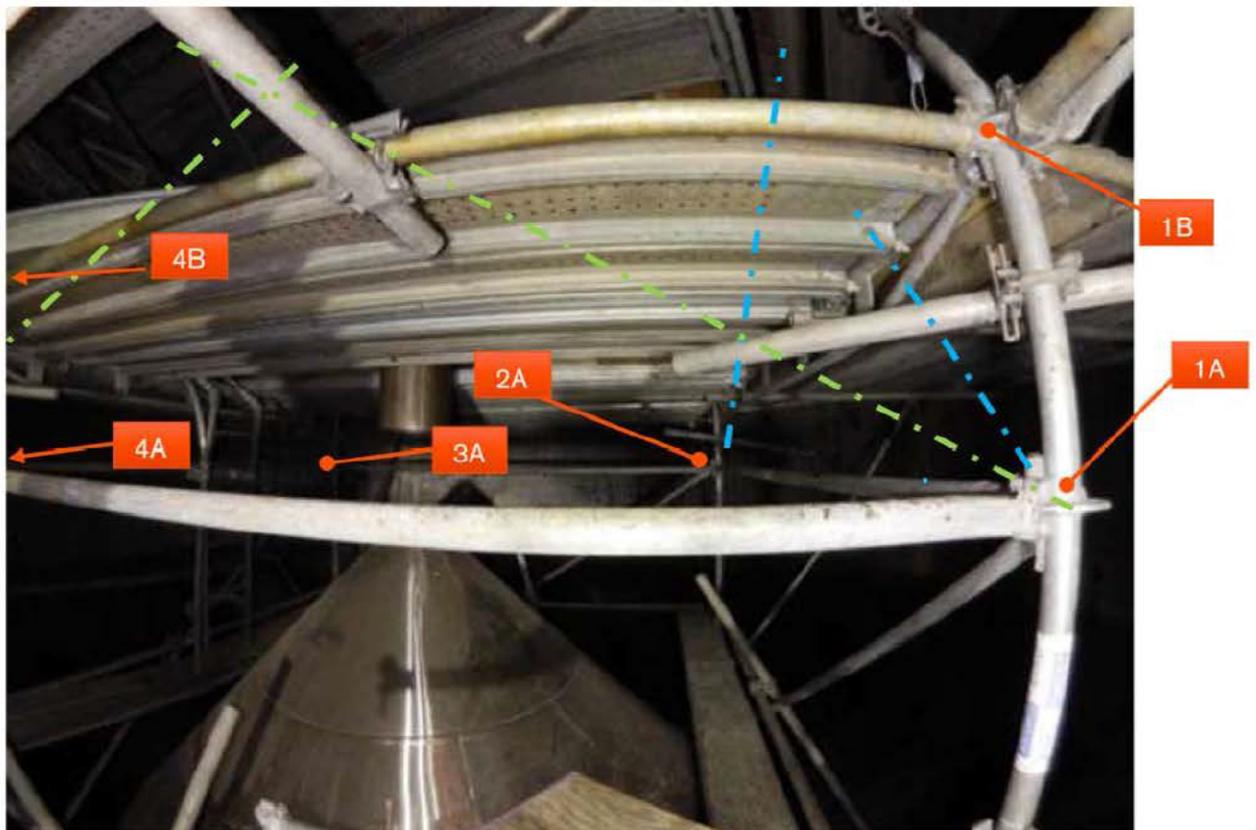


Figure 28 - Prise #1 - Manhole - Face (Drone) et extrait des plans correspondants

La Figure 29 montre le bris de continuité des barres diagonales par la prise de vue à l'entrée du trou d'homme « Manhole » du niveau 1 du lessiveur. Les prises de vue au-dessus du 1<sup>er</sup> niveau installé de plancher, correspondant au niveau 2, soulèvent également le doute sur le manque d'installation de barre diagonale dans ce secteur (voir Figure 30).



Figure 29 - Prise #2 - Manhole - Face (Drone)

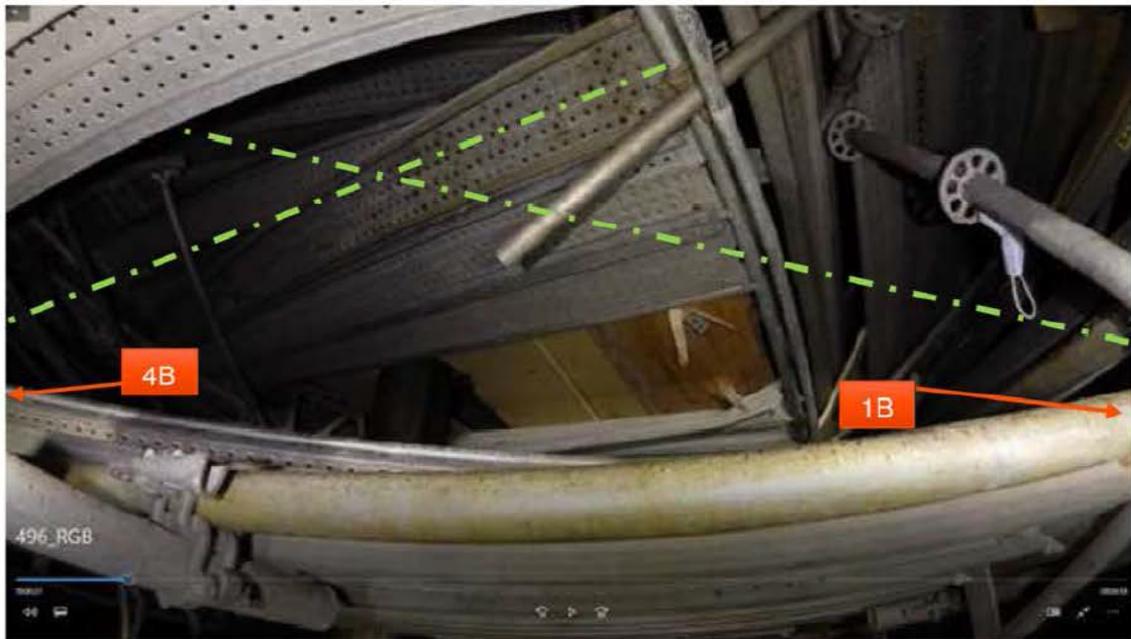


Figure 30 - Prise #3 - Manhole - Face - Niv 2 (Drone)

Les Figure 31 et Figure 32 présentent les mêmes situations, mais dans des plans verticaux (plan délimité par les nœuds 1B et 2B ou plan délimité par les nœuds 1B et 4B) où on peut soulever encore une fois un doute sur le manque d'installation des contreventements identifiés par l'une ou l'autre des lignes pointillées d'une même couleur.

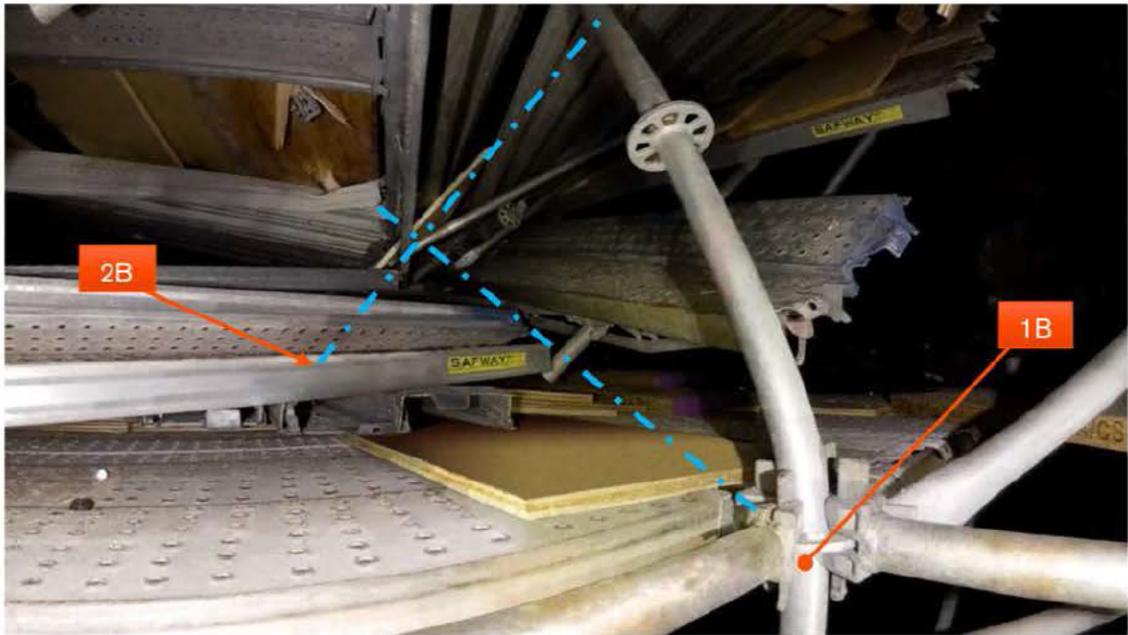


Figure 31 - Prise #4 - Manhole - Face - Niv 2 (Drone)

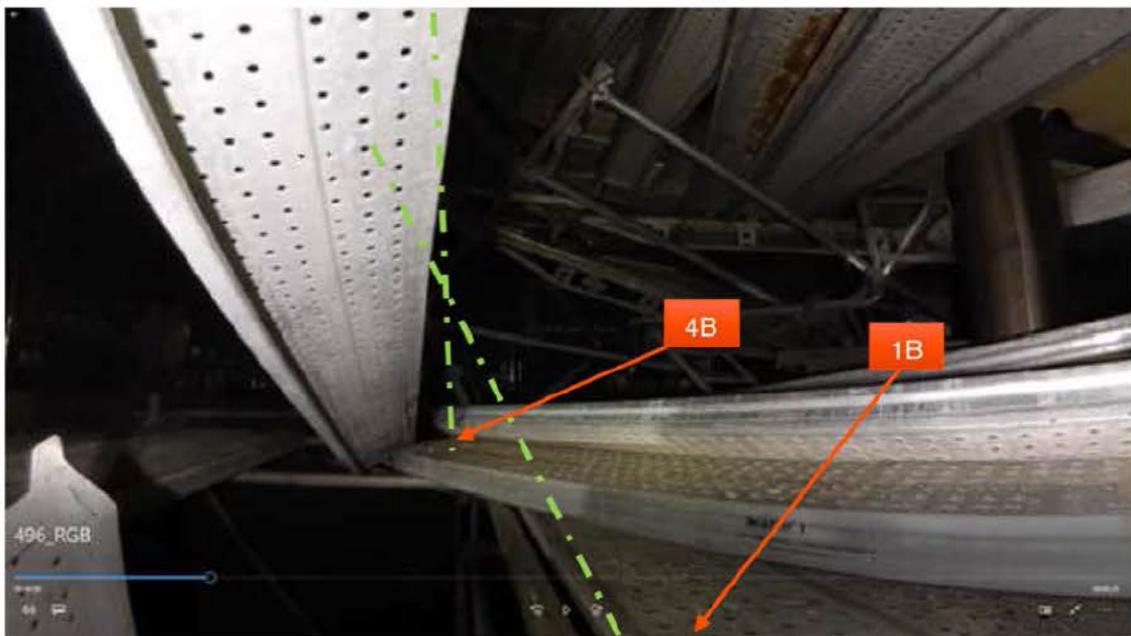


Figure 32 - Prise #5 - Manhole - Gauche - Niv 2 (Drone)

Sur le plan (délimité par les nœuds 3A et 4A) de la Figure 33, nous devrions retrouver une barre diagonale représentée par l'une ou l'autre des lignes mauves pointillées. C'est également le cas pour le plan (délimité par les nœuds 2A et 3A) de la Figure 34 où une barre diagonale devrait être présente pour l'une ou l'autre des lignes jaunes pointillées.

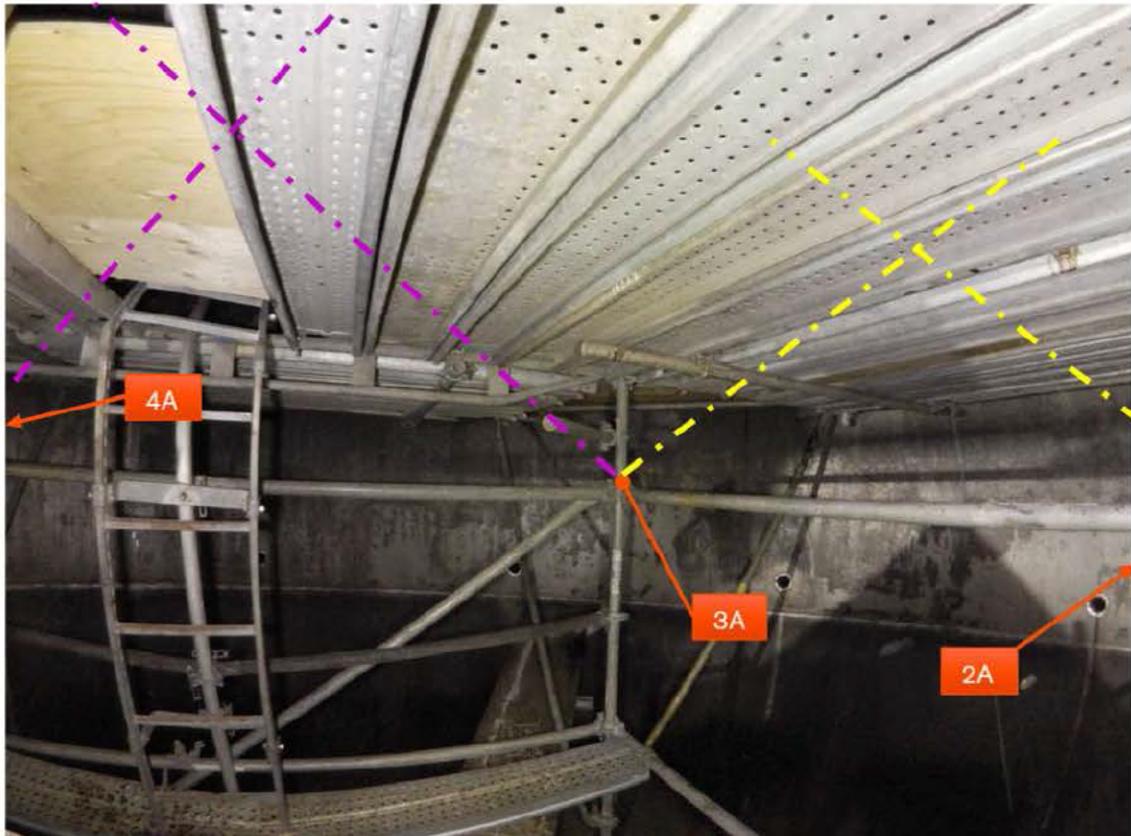


Figure 33 - Prise #2 - Manhole - Gauche (Drone)

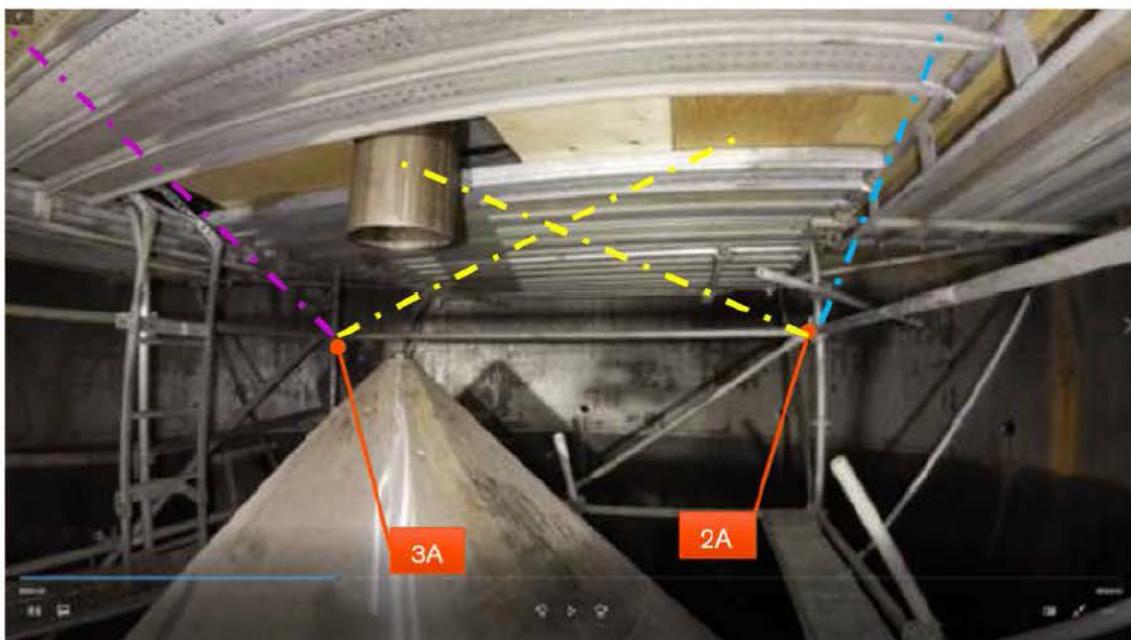


Figure 34 - Prise #5 - Manhole - Arrière (Drone)

### Commentaires

On remarque ici non seulement une perte de continuité dans le contreventement intérieur à l'échafaudage, mais également un manque de concordance entre l'installation des barres diagonales réalisée sur site et celle prévue sur le plan d'échafaudage.

Ne pouvant pas valider si d'autres pertes de continuité ont été effectuées sur l'échafaudage avant son effondrement, il devient difficile d'évaluer si un bris de continuité sur un niveau supérieur puisse avoir joué un rôle dans l'effondrement. Ces observations laissent cependant planer un doute sur la possibilité que d'autres ajustements ou modifications puissent avoir été effectués sur les niveaux supérieurs, ceux-ci pouvant différer de la configuration prévue sur les plans émis pour construction.

## PLANCHERS EN SAILLIE

### Observations

D'après les photographies provenant du drone, nous soulevons la possibilité que l'appui des planchers en saillie soit localisé aléatoirement tout au long de l'échafaudage. La flèche #3C de la Figure 35 présente l'appui des barres diagonales provenant des planchers en saillie, où aucun blocage horizontal n'est visible. Le même phénomène a été observé au même niveau, et ce pour les 4 poteaux.



Figure 35 - Prise #3 - Manhole - Gauche

### Commentaires

Puisqu'aucune attestation de conformité n'a été émise, il est difficile d'affirmer ou d'infirmer que le montage était conforme aux exigences des plans et devis. Nos observations laissent cependant planer un doute. Il n'est également pas possible d'estimer l'importance de potentielles non-conformités puisqu'elles n'ont pas été identifiées sur l'ensemble de la charpente de l'échafaudage.

# ANALYSES STRUCTURALES PAR LOGICIEL

## MODÈLES 3D ET HYPOTHÈSES

Une analyse avancée de l'échafaudage a été faite à l'aide du logiciel SAFI (voir Figure 36). Pour y parvenir, nous avons modélisé l'entièreté de l'échafaudage. Ce modèle correspond à nos interprétations des plans et devis à partir des caractéristiques des composantes du système « Sure Lock » par AlumaSafway.

Hypothèses principales utilisées lors de notre analyse de l'échafaudage :

- Composantes d'échafaudage tel que décrites dans le manuel d'ingénierie des produits « Sure Lock », voir références;
- Hauteur non supportée latéralement des poteaux de 2 mètres;
- Poteaux verticaux continus sur toute leur hauteur, soit du niveau 1 à 9 et du niveau 9 à 16;
- Butées latérales externes efficaces;
- Montage/érection de l'échafaudage correspond aux plans et devis.

### Composantes de l'échafaudage

Malgré nos observations concernant les divers équipements retrouvés dans les décombres, nos analyses structurales ont été basées sur les produits d'échafaudage décrits dans le manuel d'ingénierie de AlumaSafway, voir documents en référence.

ÉLÉMENT STRUCTURAL	GÉOMÉTRIE	MATÉRIAUX
Poteau vertical	Tube circulaire Diamètre extérieur : 48.26mm Épaisseur de paroi : 3.05 mm	Acier Fu : 455 N/mm <sup>2</sup> Fy : 345 N/mm <sup>2</sup>
Barre horizontale	Tube circulaire Diamètre extérieur : 42.83mm Épaisseur de paroi : 2.41 mm	Acier Fu : 495 N/mm <sup>2</sup> Fy : 380 N/mm <sup>2</sup>
Barre diagonale	Tube circulaire Diamètre extérieur : 42.83mm Épaisseur de paroi : 2.41 mm	Acier Fu : 455 N/mm <sup>2</sup> Fy : 345 N/mm <sup>2</sup>
Poutrelle simple	Aire de section : 575 mm <sup>2</sup> Inertie Ixx : 2.43 x 10 <sup>6</sup> mm <sup>4</sup> Module de section Sx: 3,05 x 10 <sup>4</sup> mm <sup>3</sup>	Acier Fu : 455 N/mm <sup>2</sup> Fy : 345 N/mm <sup>2</sup>
Tuyau raccord	Tube circulaire Diamètre extérieur : 50mm Épaisseur de paroi : 3.2 mm	Aluminium Fu : 260 N/mm <sup>2</sup> Fy : 240 N/mm <sup>2</sup>
Poutre Aluma	Aire de section : 1721 mm <sup>2</sup> Inertie Ixx : 7,08x 10 <sup>6</sup> mm <sup>4</sup> Module de section Sx: 1,045 x 10 <sup>5</sup> mm <sup>3</sup>	Aluminium Fu : 260 N/mm <sup>2</sup> Fy : 240 N/mm <sup>2</sup>

Tableau 4 - Propriétés des membrures

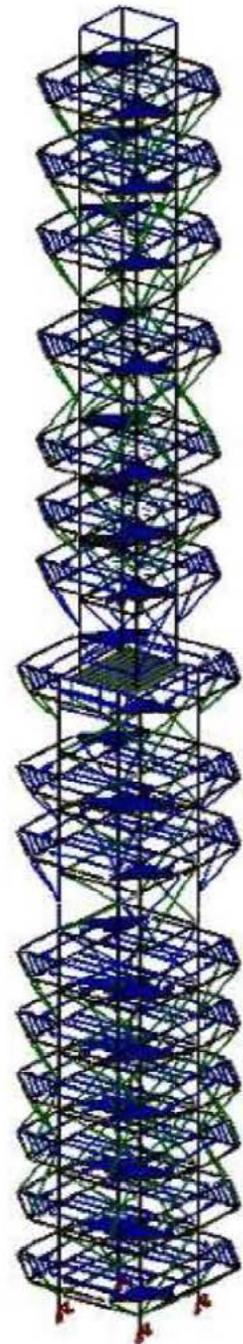


Figure 36 - Représentation 3d du modèle 1

La charge admissible de chaque élément est énoncée dans la documentation technique fournie par le manufacturier.

### Poteaux verticaux continus des niveaux 1 à 9 et des niveaux 9 à 16

Le calcul de capacité d'un élément en compression se fait en fonction de sa longueur effective « KL ». Dans cette expression, « L » représente la longueur de la membrure entre ses supports latéraux, 2 mètres dans l'occurrence, tandis que « K » est un coefficient utilisé pour représenter les conditions de retenue aux extrémités de la membrure.

Les poteaux sont connectés bout à bout à l'aide de manchons (voir Figure 37). Ce manchon permet un transfert de rigidité d'un poteau vertical au poteau sous-adjacent.

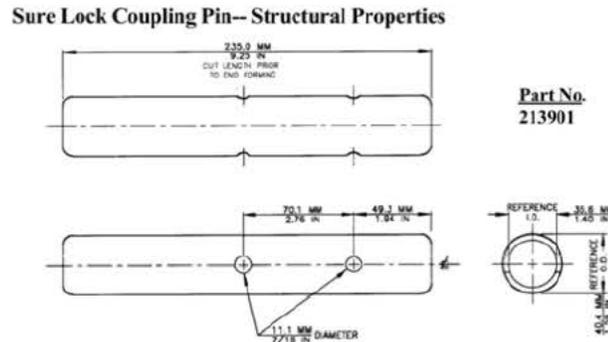


Figure 37 - Extrait manuel d'ingénierie « Sure Lock », manchon de colonne

En considérant cette condition de retenue comme étant « parfaite », il a été déterminé qu'un coefficient « K » de 0.66 pourrait être utilisé dans nos analyses. La longueur effective « KL » serait donc égale à 1,32 mètre.

Une rétro-ingénierie des manuels d'ingénierie du système « Sure Lock » nous a permis de constater que les coefficients « K » suivants nous permettent d'obtenir les charges admissibles illustrées aux tableaux (voir Figure 38) :

- Poteau contreventé aux 1 m c/c, coefficient « K » = 0.816;
- Poteau contreventé aux 1,5 m c/c, coefficient « K » = 0.725;
- Poteau contreventé aux 2 m c/c, coefficient « K » = 0.672;

**Allowable Vertical Load**  
(12 in screw extension)  
bracing in two directions

2 m brace spacing (most typical)		1 m brace spacing		1.5 m brace spacing		3 m brace spacing	
lb	kN	lb	kN	lb	kN	lb	kN
4,500	20.0	6,840	30.4	5,500	24.5	2,000	8.9

- (1) The above loads do not allow for any secondary bending moments. See next page.
- (2) Screw jack allows 18 in adjustment at 4,500 lb and lesser loads at extension to 24 in.
- (3) All F.S.: 4:1

Figure 38 - Extrait manuel d'ingénierie « Sure Lock », charge admissible poteaux

Pour ce qui est de l'échafaudage analysé dans ce rapport, puisque les poteaux sont contreventés aux 2 mètres, un coefficient « K » de 0.67 a été entré dans notre modèle 3d d'analyse de structure.

### Butées latérales externes efficaces

Notre équipe technique a jugé que, puisque l'échafaudage est confiné à l'intérieur du lessiveur, une analyse de stabilité latérale globale de l'échafaudage n'était pas nécessaire. En considérant les butées latérales comme parfaitement efficaces, nous pouvons donc nous concentrer sur le comportement local des membrures composant l'échafaudage.

## Montage/érection de l'échafaudage correspondant aux plans et devis

Les défauts de montage de l'échafaudage, étant difficiles à déterminer avec précision, ne sont pas visés par les analyses présentées dans la section suivante. Les contreventements sont ainsi continus tout le long de l'échafaudage.

## CAS DE CHARGEMENT

### Charge morte

La charge morte utilisée dans notre analyse avancée correspond à la masse totale mesurée en fonction de l'équipement retrouvé sur place, soit 45 008 lb (200.3 kN).

### Charge vive

Plusieurs cas de chargements ont été analysés. Une attention particulière a été portée aux suivants :

1. Deux travailleurs au niveau 7, soit un au bout du plancher en saillie et l'autre sur la partie centrale du plancher (voir Figure 39);
2. Deux travailleurs au niveau 7, soit les deux au bout du plancher en saillie selon les trois variantes suivantes;
  - a. Sur l'échafaudage tel qu'illustré aux plans et devis (voir Figure 40);
  - b. Sur l'échafaudage modifié de manière à ajouter une barre horizontale à l'appui de la diagonale sous le plancher en saillie du niveau 7 (voir Figure 41);
  - c. Sur l'échafaudage modifié de manière à ajouter un contreventement oblique à l'appui de la diagonale sous le plancher en saillie du niveau 7 (voir Figure 42);
3. Dix travailleurs, se retrouvant tous près de la même colonne, à des niveaux superposés (charge de 10 travailleurs concentrée sur une seule colonne);

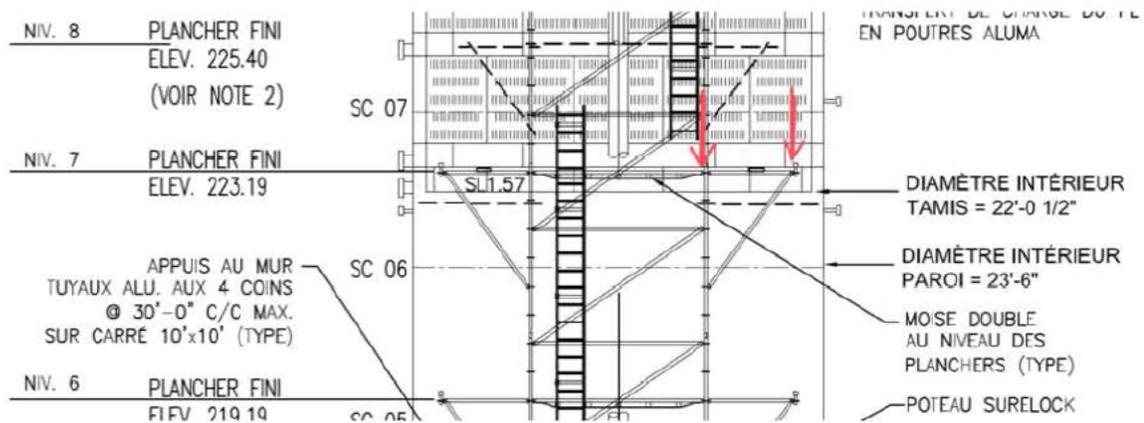


Figure 39 - Représentation visuelle, cas de chargement 1

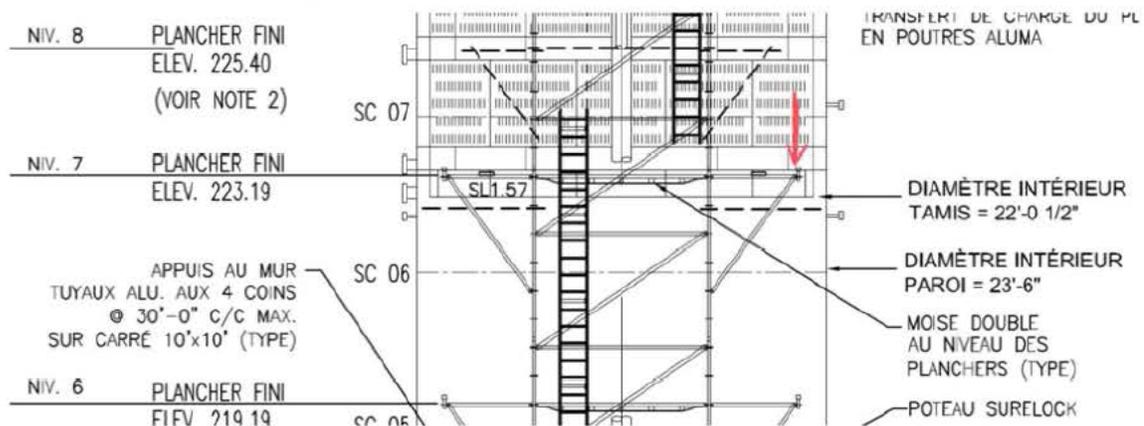


Figure 40 - Représentation visuelle, cas de chargement 2.a

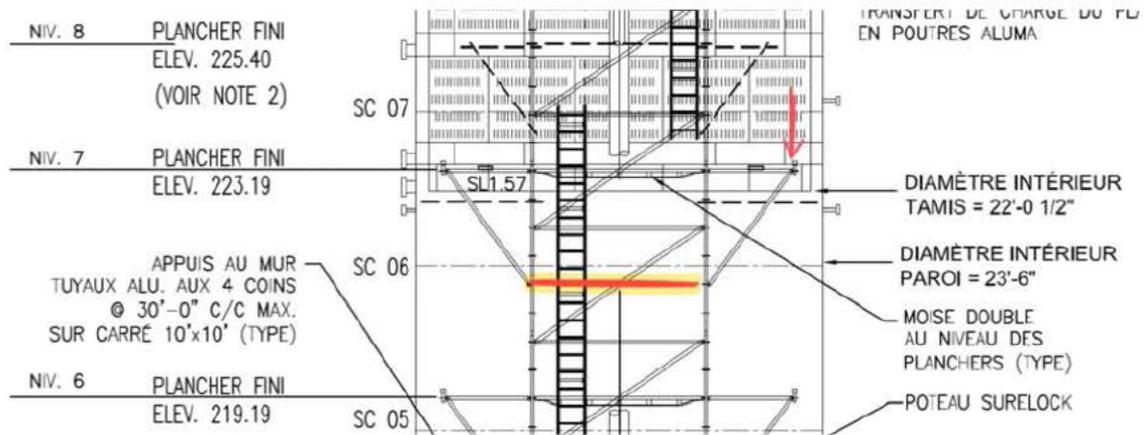


Figure 41 - Représentation visuelle, cas de chargement 2.b

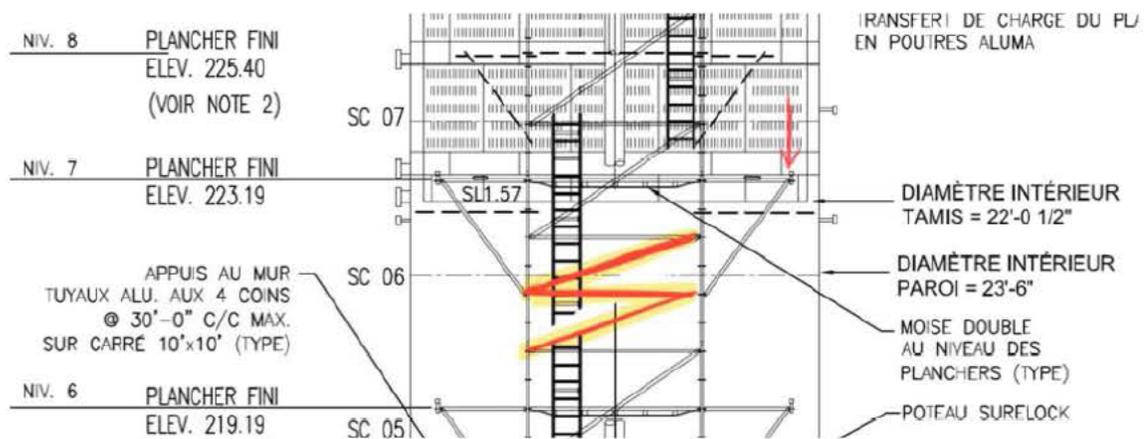


Figure 42 - Représentation visuelle, cas de chargement 2.c

Le poids des travailleurs se retrouvant au niveau 7 lors de l'effondrement, soit une charge de 90 kg correspondant à 0.88 kN (198 lb), a été utilisée par travailleur.

Il a été soulevé précédemment dans ce rapport que, sur sa note de calcul, D [redacted] a considéré un maximum de dix travailleurs sur l'échafaudage. Il a cependant réparti leur poids également sur les 4 colonnes. Or, il se pourrait que les dix travailleurs soient superposés sur plusieurs niveaux adjacents, concentrant ainsi la charge sur un seul poteau vertical. Le cas de chargement 3 vise à analyser cette possibilité.

### Charges dynamiques

Les charges appliquées représentent le poids exact des matériaux et des ouvriers. Les situations suivantes pourraient amplifier ces charges statiques :

- Mouvement brusque du travailleur (Exemple : sauter d'une échelle);
- Chute d'un travailleur (Exemple : Trébucher et amortir son impact avec ses mains sur le plancher);
- Travaux d'entretien dans le lessiveur (Exemple : un ouvrier utilise un outil et force sur un équipement fixé au lessiveur).

Ces trois exemples n'ont pas été considérés dans nos analyses présentées dans cette section, mais font écho d'une amplification probable des charges appliquées sur l'échafaudage.

## TYPE D'ANALYSE MENÉE

### Analyse statique linéaire

Une première méthode d'analyse statique linéaire a été lancée. Ce type d'analyse considère que tous les éléments travaillent dans le domaine élastique et représente une méthode équivalente aux analyses manuscrites effectuées par D [redacted].

Puisque cette méthode d'analyse néglige l'effet P-Delta (voir section suivante), les efforts dans les membrures seront forcément sous-estimés.

### Analyse statique P-Delta

Une analyse P-Delta a été menée à l'aide du logiciel d'analyse de structure SAFI. Ce type d'analyse avancée vise à estimer les contraintes maximales dans une membrure comprimée par une charge « P », combiné à un déplacement « Delta » agissant selon une orientation perpendiculaire à cette charge.

Une structure déformée par ce déplacement imposé « Delta » peut rencontrer des moments secondaires considérables, car la charge en compression peut alors générer des efforts de flexion en plus de celles de compression attendus. La charge en compression vient alors, à son tour, amplifier la déformée de la membrure en compression. Ce type d'analyse est notamment significatif lorsqu'une colonne élancée est également chargée latéralement.

Une analyse P-Delta doit se faire de manière itérative, ce qui la rend difficile à réaliser sans logiciel d'analyse de charpente. Cet effet n'est également pas considéré dans le manuel d'ingénierie du fournisseur puisque son impact varie en fonction de la configuration précise de l'ouvrage.

Il n'est pas attendu d'un ingénieur concepteur en échafaudage de mener une analyse P-Delta si cet ingénieur utilise des hypothèses de calcul et facteurs de sécurité suffisants. Il a été jugé nécessaire de le faire dans cette analyse post-effondrement afin de produire des résultats d'analyse d'une grande précision et d'ainsi ouvrir une discussion sur le niveau de sécurité de cet échafaudage.

## RÉSULTATS D'ANALYSE

Lors de nos analyses de capacité portante de l'échafaudage, une attention particulière a été portée au poteau vertical sous le plancher du niveau 7 ainsi qu'au poteau vertical au niveau 1. Le poteau sous le niveau 7 est particulièrement critique, puisqu'il est sollicité en compression/flexion étant donné que le plancher en saillie y prend appui (voir Figure 43 pour une représentation visuelle de la déformée du poteau sous le niveau 7).

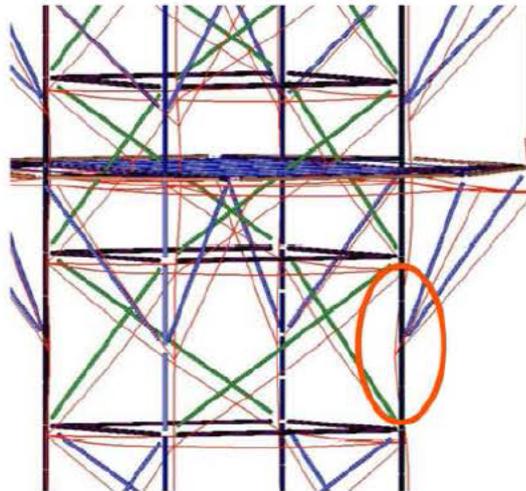


Figure 43 - Déformée de la colonne sous le niveau 7 (amplifiée 50mm = 1m)

Le tableau suivant (Tableau 5) illustre un pourcentage de sollicitation de ces membrures en fonction des différents cas de chargement présentés précédemment. Ces résultats n'ont aucun facteur de sécurité en réserve, c'est-à-dire qu'une sollicitation au-dessus de 100% devrait occasionner une rupture de l'élément chargé.

CAS DE CHARGEMENT	ANALYSE STATIQUE LINÉAIRE, SOLLICITATION (%)		ANALYSE « P DELTA », SOLLICITATION (%)	
	POTEAU VERTICAL, NIVEAU 7	POTEAU VERTICAL, NIVEAU 1	POTEAU VERTICAL, NIVEAU 7	POTEAU VERTICAL, NIVEAU 1
1	84%	95%	96%	96%

2a	102%	95%	121%	97%
2b	65%	95%	74%	97%
2c	50%	95%	51%	97%
3	70%	102%	77%	104%

Tableau 5 - Sommaire des résultats d'analyse

## DISCUSSION

Les cas de chargement 1, 2a et 3 représentent des situations très probables en chantier alors que les cas de chargement 2b et 2c visent à estimer l'impact qu'aurait eu une configuration structurale différente.

Nous constatons que :

- Il y a rupture du poteau vertical sous le niveau 7 lorsque deux travailleurs se retrouvent au bout du plancher en saillie;
- Il y a rupture du poteau vertical niveau 1 lorsque la charge de 10 travailleurs est cumulée sur un seul axe;
- Il n'y a pratiquement aucune marge de manœuvre, puisqu'aucun facteur de sécurité n'a été considéré dans ces analyses.

Les cas de chargement 2b et 2c démontrent que l'ajout d'une barre horizontale directement à l'appui de la diagonale supportant le plancher en saillie aurait fait passer la sollicitation de ce poteau de 121% à 74% (FS= 1,35) alors que l'ajout d'un contreventement oblique à ce même endroit permettrait de diminuer la sollicitation à 51% (FS = 1,96). La rupture de cette membrure aurait ainsi été évitée. Cependant, le facteur de sécurité de 4,0 demandé à la norme ainsi que le facteur de sécurité de 3,0 indiqué aux plans et devis ne seraient toujours pas atteints).

Le lecteur doit considérer qu'il existe une certaine variabilité statistique dans le calcul de capacité portante d'éléments structuraux. Deux structures qui, à toute fin pratique semblent identiques, auront une capacité ultime qui varie en fonction de :

- La qualité des matériaux (variabilité dans la qualité de l'acier fourni, homogénéité). Cette variabilité explique l'existence du coefficient de tenue dans la méthode d'analyse aux états limites;
- La qualité de fabrication (poteau parfaitement rectiligne ou non). Cette variabilité est prise en considération dans les formules mathématiques permettant d'estimer la capacité structurale d'une membrure;
- La variabilité dans les charges appliquées. Cette variabilité est prise en charge par les différents facteurs de pondération de charge inclus dans la méthode d'analyse aux états limites.

Il est donc probable que, bien que nos analyses illustrent un effondrement imminent, ce même échafaudage ait été réalisé dans le passé sans s'effondrer.

## CONCLUSIONS

Cette section présente un sommaire de nos conclusions quant aux éléments ayant eu une influence sur l'effondrement de l'échafaudage. L'ensemble de nos observations et de nos analyses nous mène à conclure que plusieurs causes concomitantes ont contribué à l'effondrement de cet échafaudage de manière plus ou moins importante. Pour ces raisons, il est impossible d'en ressortir une seule et unique cause.

C'est pourquoi nous présentons, pour chacun des facteurs, une pondération variant de 0, cause d'aucune importance dans l'effondrement, à 5, cause de grande importance dans l'effondrement. Les causes écartées ou jugées comme n'ayant pas contribué à l'effondrement ne seront pas traitées.

### MODE D'EFFONDREMENT

D'après les analyses menées dans le cadre de cette expertise technique, nous sommes d'avis que l'effondrement a pris origine au niveau d'un des 4 poteaux verticaux localisés sous le plancher en saillie du niveau 7. Il a été démontré que ce poteau, chargé en compression/flexion, était sollicité à 121% si deux travailleurs se trouvent directement au bout du plancher, soit directement au-dessus de l'appui de la diagonale.

Si **D** avait respecté un facteur de sécurité de 3,0 comme il l'avait indiqué à ses plans et devis, une sollicitation maximale de 33,3% aurait été tolérée, contrairement à la sollicitation de 121% calculée lors de nos analyses (voir Tableau 5).

### CAUSES

Les causes suivantes ont été identifiées comme ayant contribué, chacune à leur façon, à cette rupture. Chacune de ces causes sont détaillées dans les sections précédentes du rapport :

#### Facteur de sécurité de conception insuffisant

Facteur d'importance : 4/5

Comme il a été démontré, l'utilisation d'un facteur de sécurité plus faible que celui recommandé dans la norme CAN/CSA S269.2 a joué un rôle majeur dans les causes de l'effondrement. L'utilisation d'un facteur de sécurité adéquat aurait considérablement réduit les risques d'effondrement de la structure de cet échafaudage.

#### Masse de l'échafaudage sous-estimée

Facteur d'importance : 4/5

La masse totale de l'échafaudage a été sous-estimée d'environ 25,3%. Puisque cette masse est la charge principale à laquelle sont soumis les poteaux, cette cause a joué un rôle majeur dans son effondrement.

#### Absence d'élément stabilisant le poteau sous le niveau 7

Facteur d'importance : 4/5

La combinaison compression/flexion dans les poteaux verticaux aurait initié la rupture d'un des poteaux verticaux. Un renforcement local à l'appui de la diagonale supportant le plancher en saillie aurait augmenté significativement la capacité structurale de l'échafaudage et aurait pu empêcher cet effondrement.

#### Hypothèses de calcul erronées quant à la retenue latérale des poteaux verticaux

Facteur d'importance : 3/5

Dans sa note de calcul, **D** a considéré une retenue latérale des poteaux verticaux à chaque 1,5m, alors qu'il a été constaté qu'ils étaient réellement espacés à chaque 2,0m. Cette hypothèse a fait en sorte que la capacité portante des poteaux a été surestimée.

### Hypothèses de conception limitatives

Facteur d'importance : 2/5

D [REDACTED] a limité la charge vive à 10 travailleurs sur l'échafaudage. Dans ses calculs, D [REDACTED] a considéré cette charge vive également distribuée entre les 4 poteaux constituant l'échafaudage. Cette hypothèse de calcul est idéalisée si l'on tient compte de la réalité de chantier, où il est inévitable que plus de 3 travailleurs sur les 10 permis puissent surcharger un même poteau vertical. La hauteur de l'échafaudage combinée à la faible surface de chaque plancher rend très limitative cette contrainte et laisse très peu de marge aux aléas de chantier. Par ailleurs, les limitations sur la charge vive n'ont eu aucune incidence sur le niveau de sécurité global de l'échafaudage, étant donné que la charge morte était de loin prédominante sur la charge vive.

### Manque d'encastrement aux butées latérales

Facteur d'importance : 1/5

Les butées latérales n'étaient pas continues dans l'échafaudage et n'étaient pas encastrees de manière efficace. Il est cependant jugé que, puisque l'échafaudage est confiné à l'intérieur du lessiveur, cette situation n'est pas critique. Elle aurait cependant pu causer un léger débalancement, ce qui aurait eu comme effet de surcharger davantage certains poteaux.

### Absence d'exigences de capacité minimale des équipements / équipements provenant de différents fournisseurs / manufacturiers

Facteur d'importance : 1/5

La capacité minimale des éléments constituant l'échafaudage n'est pas indiquée. Puisque chaque fournisseur offre des équipements ayant une charge admissible différente, l'installateur ou l'utilisateur ne peut pas savoir si ces équipements répondent aux exigences de D [REDACTED]. De plus, la présence d'équipements de provenances multiples fait écho d'un manque de contrôle qualité des matériaux au chantier. On ne peut cependant pas attribuer un facteur d'importance élevé à cet aspect.

### Appui vertical à la base

Facteur d'importance : 0/5

L'appui vertical à la base était fortement surchargé et le tuyau le stabilisant n'était pas présent. Mais puisque cet élément était toujours en place lors du relevé vidéo, il est évident qu'il n'a pas causé l'effondrement.

## CAUSES IMPONDÉRABLES

Nous souhaitons également attirer l'attention sur les causes qui, bien que leur contribution à l'effondrement soit impossible à établir, peuvent avoir joué un rôle :

### Divergences entre l'installation effectuée et les plans pour construction

Basés sur les divergences constatées entre la section restée intacte après effondrement (images provenant du drone) et le plan émis pour construction, nous estimons, de moyenne à élevée, la probabilité que d'autres divergences par rapport aux plans puissent avoir été réalisées sur l'échafaudage dans la zone critique.

Prises indépendamment des autres facteurs énumérés précédemment, nous pensons qu'elles ne peuvent avoir joué de rôle majeur dans l'effondrement à elles seules. Cependant, basés sur l'importance des divergences soulevées (perte de continuité dans les barres obliques, appui de plancher en sailli sans blocage des poteaux verticaux), la combinaison de celles-ci à l'un ou plusieurs de ces facteurs pourrait contribuer à l'effondrement. Ne pouvant valider avec certitude cette hypothèse, il devient impossible d'en évaluer adéquatement le niveau de contribution. C'est pourquoi elle fait partie des causes impondérables, mais plausibles.

### Usure/dommage des composantes

Les équipements composant l'échafaudage n'étaient pas neufs. Il est plausible qu'un des poteaux verticaux puisse avoir été installé endommagé ou bien qu'un de ceux-ci puisse avoir comporté un défaut, réduisant ainsi sa capacité admissible.

L'échafaudage étant monté sur seulement 4 poteaux verticaux, il en résulte un système qui n'offre aucune redondance. La rupture d'une colonne peut donc entraîner un effondrement généralisé.

### Mauvaise manipulation

De par notre expérience, nous croyons plausibles les possibilités suivantes, lesquelles ne peuvent être validées :

- Qu'un ouvrier puisse avoir retiré temporairement un élément secondaire (ex : barre diagonale servant au contreventement latéral intérieur de l'échafaudage) dans le but de faciliter ses opérations à l'intérieur du lessiveur. Une telle manipulation aurait mis en jeu la stabilité globale de l'échafaudage ainsi que la retenue latérale d'un poteau vertical.
- Qu'un des poteaux puisse avoir été utilisé comme point d'appui à un ouvrier, dans le but d'augmenter son bras de force pour effectuer des travaux sur les tamis, ce qui pourrait avoir généré une charge latérale suffisante pour déclencher l'effondrement.

## SOMMAIRE

Notre travail d'investigation structurale nous a menés à conclure que l'effondrement de l'échafaudage érigé dans le lessiveur de l'usine de Domtar aurait été occasionné par la combinaison de plusieurs causes. Individuellement, chacune de ces causes n'aurait probablement pas été suffisante pour entraîner un effondrement. Cependant, la combinaison de plusieurs d'entre elles l'a été.

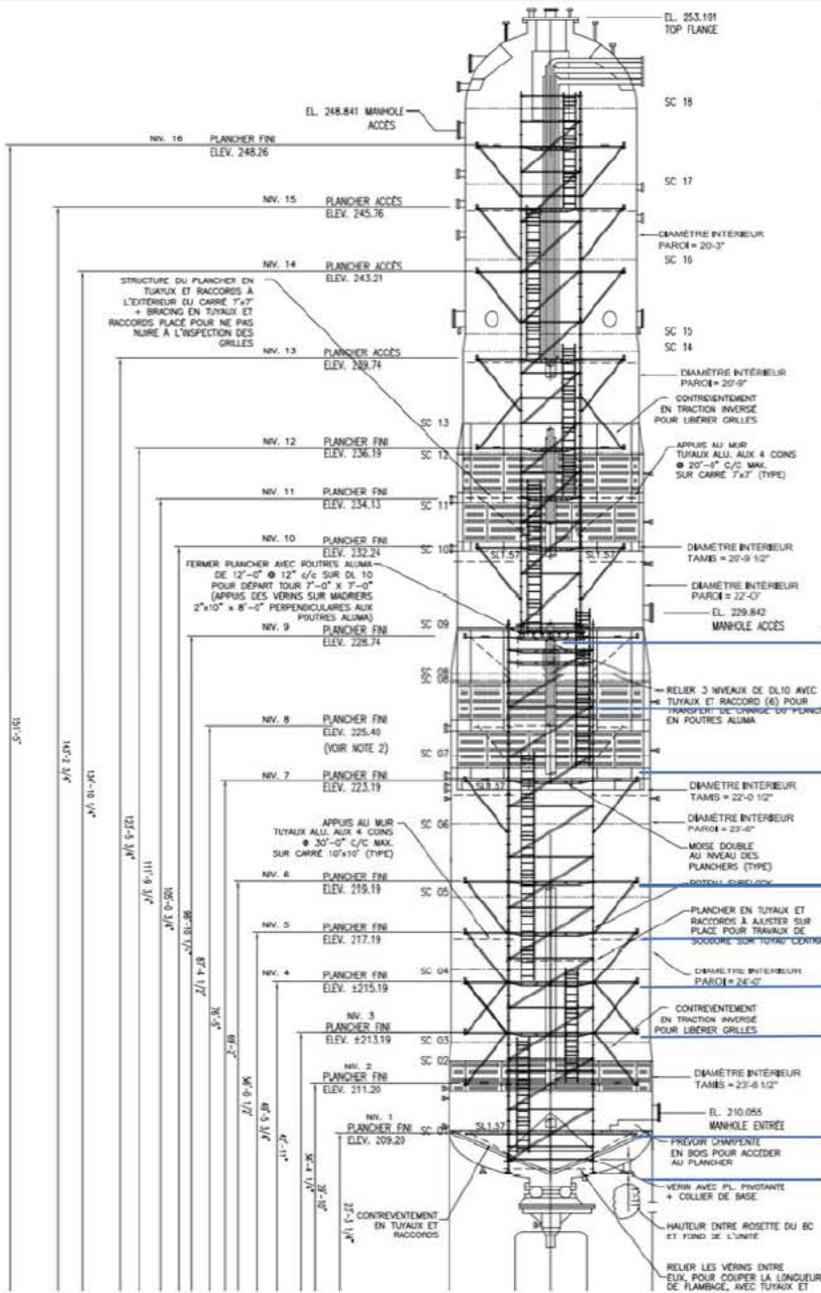
Les causes prédominantes sont :

- Facteur de sécurité de conception insuffisant;
- Masse de l'échafaudage sous-estimé;
- Absence d'élément stabilisant le poteau sous le niveau 7.

À elles seules, ces trois causes seraient suffisantes pour entraîner l'effondrement de l'échafaudage.

# **ANNEXE 1 - ANALYSE DE MASSE DE L'ÉCHAFAUDAGE**

---



SECTION 7'	
Poids total section	14 068 lb
Hauteur section	42,0 m
Poids section centrale / pi.li. De ht	102,1 /pi.li.
Poids / plancher (de la section)	1 433 lb

SECTION TRANSITION	
Poids total section 10pi	2 923 lb

SECTION 10'	
Poids total section 10pi	19 403 lb
Hauteur section 10'	36,0 m
Poids section centrale / pi.li. De ht	164,3 /pi.li.
Poids / plancher (de la section)	1 990 lb

Surf. 7'	849pi <sup>2</sup>
Surf. 10'	905pi <sup>2</sup>

POUR LE CALCUL DE LA CHARGE MORTE	
Poids Tot provenant de la section de 7' ->	14 068 lb
Poids total de la transition de Transition ->	2 923 lb

Niv	m li. Prof	pi.li. Prof	sect. Centrale	Plancher	S-Tot (dead)
9					
8	0				
7	6	19,7	3 234 lb	1 433 lb	21 658 lb
6	14	45,9	7 546 lb	1 433 lb	25 970 lb
5	20	65,6	10 779 lb	1 433 lb	29 203 lb
4	22	72,2	11 857 lb	1 433 lb	30 281 lb
3	26	85,3	14 013 lb	1 433 lb	32 437 lb
2	30	98,4	16 169 lb	1 433 lb	34 593 lb
1	34	111,5	18 325 lb	1 433 lb	36 749 lb
0	36	118,1	19 403 lb		<b>36 394 lb</b>

Total dead load (selon take-off SNadeau)

S-Total dead load / patte (selon take-off SNadeau)

pois contreplaqué	0,3 lb/pi <sup>2</sup>
% surface plancher	50%
Nbre plancher (Sect. 7')	7
Nbre plancher (Sect. 10')	9

RÉSUMÉ			
	Total	Par poteau	4
Charge morte	36 394 lb	9 099 lb	
Charge morte bois (secteur 7')	892 lb	223 lb	
Charge morte bois (secteur 10')	1 221 lb	305 lb	
Charge morte add (Extra ±10%)	3 500 lb	875 lb	
<b>Charge morte totale</b>	<b>42 007 lb</b>	<b>10 502 lb</b>	

# **ANNEXE 2 - LISTE DES ÉQUIPEMENTS REÇUS**

---

NO. GROUPE	CODE	QUANTITÉS	DESCRIPTION	POIDS	TOTAL POIDS
<b>LISTE DE MATÉRIEL POUR LOCATION</b>					
10	16	12	BEAM ALUMA 12ft (3.66M)	48	576
1	ALT12	20	12' ALUMINUM TUBE	11.94	238.8
1	ALT8	75	8' ALUMINUM TUBE	7.49	561.75
1	ALT7	150	7' ALUMINUM TUBE	6.97	1045.5
1	ALT6	40	6' ALUMINUM TUBE	5.97	238.8
1	ALT4	80	4' ALUMINUM TUBE	3.98	318.4
1	RACW	450	RIGHT ANGLE WEDGE CLAMP 2" X 2"	3.25	1462.5
1	SCW	300	SWIVEL WEDGE CLAMP 2X2	3	900
406	LVAC	64	LAYHER VERTICAL ADAPTER CLAMP(RA)	3	192
406	LVAC-S	64	LAYHER ADAPTER SWIVEL	3	192
1	JTP	20	EXPANDING JOINT PIN (END TO END P1125)	3	60
411	1522	16	UPRIGHT W/SPIGOT 10.5	7	112
5	BCSSV	24	BEAM CLIP SCAF SPEC V C/W BT	1.41	33.84
411	8311	8	CLAMPABLE ROSETTE	2.3	18.4
07	100097	12	MUD SILL 10"X12"X12"	10	120
90	SIB	20	SCREWJACK W/BASEPLATE 24"	8.15	163
90	SJS	4	SURELOCK SCREWJACK SWIVEL BASE	21	84
411	SLBC	128	SURELOCK BASE COLLAR	4.14	529.92
411	SLB10	50	SURELOCK BRACE 10FT (3.05M)	25	1250
411	SLB7	50	SURELOCK BAY BRACE 2.13M TSS	20	1000
411	SLB52	75	SURELOCK BRACE 5'2" (1.52M)	18	1350
411	SLB310	50	SURELOCK BRACE 3FT 10IN(1.15M)	17	850
411	SLDH10	20	SURELOCK DBL LEDGER 10FT 3.05M	46	920
411	SLDH70	18	SURELOCK DBL LEDGER 7FT ( 2.13M)	33	594
411	SLH10	160	SURELOCK LEDGER 10FT (3.05M)	27	4320
411	SLH70	100	SURELOCK LEDGER 7FT (2.13M)	19	1900
411	SLH52	125	SURELOCK LEDGER 5FT 2IN(1.57M)	15	1875
411	SLH310	100	SURELOCK LEDGER 3FT 10 (1.15M)	11	1100
411	SLH22	20	SURELOCK LEDGER 2FT 2 (0.65M)	7	140
411	SLSB1B	112	SURELOCK SIDE BRKT 1 BRD .30M	2	224
411	SLL3	9	LADDER 900MM 3'(SYS 2002)	11.65	104.85
411	SLL5	40	LADDER 1500MM 5'(SYS 2002)	18.37	734.8
411	ULBSW2	65	UNIV LADDER BRACKET C/W 2"5W	9.2	598
411	SLSG1	16	SWING GATE ASSY SINGLE PANEL S	25.74	411.84
411	SLGRV	16	GUARDRAIL STANDARD (SYS 2002)	7.9	126.4
411	SLDA	9	RETRACTABLE LANYARD ANCHOR (DA	31.14	280.26
411	7711	16	2 BOARD INTERMEDIATE SUPPORT LEDGER	8.33	133.28
07	4367	60	SCAFD. SAFETY CLIPS RPR	0.15	0
202	SLSP10	260	PLANK STEEL(SPII)10' 3.05M W/HW	40	10400
202	SLSP70	200	PLANK STEEL(SPII)7' 2.13M W/HW	28	5600
202	SLSP52	30	PLANK STEEL(SPII)5'2"1.57M W/HW	22	660
202	SLSP310	30	PLANK STEEL(SPII)3'10" 1.1M W/HW	17	510
203	LB10908	90	8' SCAFFOLD BOARD	29.6	2664
203	LB10907	60	7' SCAFFOLD BOARD	25.9	1554
203	LB10906	76	6' SCAFFOLD BOARD	22.2	1687.2
203	LB10904	60	4' SCAFFOLD BOARD	14.8	888
411	SLVP910	60	SURELOCK STANDARD 9FT 10IN(3M)	36	2160
411	SLVP67	12	SURELOCK STANDARD 6FT 7IN(2M)	24	288
411	SLVP411	12	SURELOCK STANDARD 4FT 11 1.5M	19	228
411	SLVP33	25	SURELOCK STANDARD 3FT 3IN(1M)	13	325
411	SLVP18	12	SURELOCK STANDARD .5M	7	84
07	LP	60	LOCKING PIN	0.1	0
08	SSRS	17	SYSTEM RACK SMALL	116.5	1980.5
08	2049	11	BASKET WIRE W GATE	120	1320
<b>TOTAL</b>				<b>POIDS</b>	<b>51807.54</b>

**ANNEXE 3 -** [REDACTED]

---

**ANNEXE F****Références bibliographiques**

QUÉBEC. *Loi sur la santé et la sécurité du travail, chapitre S-2.1, à jour le 1<sup>er</sup> avril 2020*, [en ligne] [Québec], Éditeur officiel du Québec, 2020, vii, 65, xii p.  
[<http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cs/S-2.1>]

QUÉBEC. *Règlement sur la santé et la sécurité du travail, chapitre S-2.1, r. 13, à jour le 25 mars 2020*, [en ligne], [Québec], Éditeur officiel du Québec, 2020, vii, 125 p.  
[<http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/showdoc/cr/S-2.1,%20r.%2013>]

ASSOCIATION CANADIENNE DE NORMALISATION. *Échafaudage d'accès pour les travaux de construction*, Toronto, Ont. Groupe CSA, 2016, 86 p. (CSA S269.2 -16).

ASSOCIATION CANADIENNE DE NORMALISATION. *Règles d'utilisation des échafaudages d'accès*, Toronto, Ont., Groupe CSA, 2018, 132 p. (CSA Z797-18).

AlumaSafway. *AlumaSafway*, [en ligne], 2022. Systemes-saflock-scaffold. [[SafLock System Scaffold<sup>MD</sup> | Systèmes d'échafaudage supportés \(alumasafway.com\)](https://www.alumasafway.com)] (consulté le 2021-11-15).