

**EN004233**

# **RAPPORT D'ENQUÊTE**

**Accident ayant causé des blessures à deux  
travailleurs de l'entreprise Briquetal Ltée sur le  
chantier de construction des Nouvelles-Casernes,  
situé au 1, rue de l'Arsenal à Québec, le 14 mai 2018.**

**Direction régionale de la Capitale-Nationale**

**Version dépersonnalisée**

**Inspecteurs :**

\_\_\_\_\_  
**Stéphanie Deschamps**

\_\_\_\_\_  
**Brigitte Turbide**

**Date du rapport : 21 août 2019**

**Rapport distribué à :**

- Monsieur [ A ], Briquetel Ltée.;
- Monsieur [ B ], Tro-Chânes inc.;
- Docteur François Desbiens, directeur de santé publique, région de la Capitale-Nationale;
- M. [ C ], CSN-Construction;
- M. [ D ], CSD-Construction;
- M. [ E ], Syndicat québécois de la construction;
- M. [ F ], FTQ-Construction;
- M. [ G ], conseil provincial du Québec des métiers de la construction (International);

## TABLE DES MATIÈRES

<b><u>1</u></b>	<b><u>RÉSUMÉ DU RAPPORT</u></b>	<b><u>1</u></b>
<b><u>2</u></b>	<b><u>ORGANISATION DU TRAVAIL</u></b>	<b><u>3</u></b>
	2.1 STRUCTURE GÉNÉRALE DU CHANTIER	3
	2.2 ORGANISATION DE LA SANTÉ ET DE LA SÉCURITÉ DU TRAVAIL	4
	2.2.1 MÉCANISMES DE PARTICIPATION	4
	2.2.2 GESTION DE LA SANTÉ ET DE LA SÉCURITÉ	4
<b><u>3</u></b>	<b><u>DESCRIPTION DU TRAVAIL</u></b>	<b><u>6</u></b>
	3.1 DESCRIPTION DU LIEU DE TRAVAIL	6
	3.1.1 LE CHANTIER	6
	3.1.2 BÂTIMENT DES NOUVELLES-CASERNES	6
	3.1.3 LE MUR DE LA FAÇADE SUD	8
	3.2 DESCRIPTION DU TRAVAIL À EFFECTUER	10
<b><u>4</u></b>	<b><u>ACCIDENT: FAITS ET ANALYSE</u></b>	<b><u>13</u></b>
	4.1 CHRONOLOGIE DE L'ACCIDENT	13
	4.2 CONSTATATIONS ET INFORMATIONS RECUEILLIES	14
	4.2.1 ÉTAT DU BÂTIMENT ET DE LA MAÇONNERIE DU MUR SUD	14
	4.2.2 TRAVAUX À RÉALISER SUR LA FAÇADE SUD ENTRE LES AXES 3 ET 4	17
	4.2.3 MÉTHODE DE TRAVAIL UTILISÉE POUR LE DÉMANTÈLEMENT DE LA FONDATION LORS DE L'ACCIDENT	18
	4.2.4 DÉTERMINATION DES BESOINS EN ÉTAIEMENT LORS DES TRAVAUX DE MAÇONNERIE	19
	4.2.5 FORMATION PROFESSIONNELLE EN MAÇONNERIE	19
	4.2.6 DESCRIPTION D'UNE MÉTHODE EN QUINCONCE/EN ALTERNANCE	20
	4.2.7 EXIGENCES DES DEVIS CONCERNANT LES TRAVAUX DE DÉMANTÈLEMENT DE LA MAÇONNERIE	21
	4.2.8 [...] ET [...] PRÉSENTS SUR LE CHANTIER	21
	4.2.8.1 Rôle des [...] engagés par le donneur d'ouvrage (CCNQ)	22
	4.2.8.2 Rôle de [ H ] de Tro-Châînes et Briquetal	22
	4.2.9 ÉTAIEMENTS ET SÉQUENCE DE TRAVAIL PROPOSÉS AU PLAN STRUCTURE DU PROJET	23
	4.2.10 ÉCHÉANCIERS	25
	4.2.11 RAPPORT D'EXPERTISE TETRA TECH – EXPLICATION DE LA RUPTURE	26
	4.2.12 FORMATION ET EXPÉRIENCE DES TRAVAILLEURS ET [ I ] DE BRIQUETAL	28
	4.2.13 EXTRAIT D'OUVRAGES ET D'ARTICLE CONCERNANT LA MAÇONNERIE TRADITIONNELLE	29
	4.2.14 LOI SUR LA SANTÉ ET SÉCURITÉ DU TRAVAIL	30
	4.2.15 CODE DE SÉCURITÉ POUR LES TRAVAUX DE CONSTRUCTION	30

<b>4.3</b>	<b>ÉNONCÉS ET ANALYSE DES CAUSES</b>	<b>31</b>
4.3.1	LE DÉMANTÈLEMENT DE LA FONDATION GÈNÈRE UNE SURCHARGE DE LA MAÇONNERIE ET CAUSE L'EFFONDREMENT DU MUR SUR LES TRAVAILLEURS.	31
4.3.2	LA MÉTHODE DE TRAVAIL UTILISÉE POUR LE DÉMANTÈLEMENT DE LA FONDATION EST INADÉQUATE, ELLE N'ASSURE PAS LA STABILITÉ DU MUR.	32
4.3.3	LE MANQUE DE PLANIFICATION DES TRAVAUX DE DÉMANTÈLEMENT DES FONDATIONS AINSI QU'UNE SUPERVISION INSUFFISANTE ENTRAÎNENT L'UTILISATION D'UNE MÉTHODE DE TRAVAIL DANGEREUSE.	33
<b>5</b>	<b>CONCLUSION</b>	<b>37</b>
5.1	CAUSES DE L'ACCIDENT	37
5.2	AUTRES DOCUMENTS ÉMIS LORS DE L'ENQUÊTE	37
5.3	RECOMMANDATIONS	37
<b><u>ANNEXES</u></b>		
ANNEXE A :	Liste des accidentés	39
ANNEXE B :	Liste des témoins et des autres personnes rencontrées	40
ANNEXE C :	Rapport d'expertise	42
ANNEXE D :	Relevé météo	64
ANNEXE E :	Références bibliographiques	65

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

Le 14 mai 2018, sur un chantier de construction situé au 1, rue de l'Arsenal à Québec, deux travailleurs procèdent au démantèlement de la fondation d'un mur massif en maçonnerie. Alors qu'ils tentent de démolir, à l'aide de marteaux pneumatiques, une masse de béton qui nuit à l'avancement des travaux, le mur s'effondre.

**Conséquence**

Les travailleurs sont frappés et coincés par les débris du mur effondré.

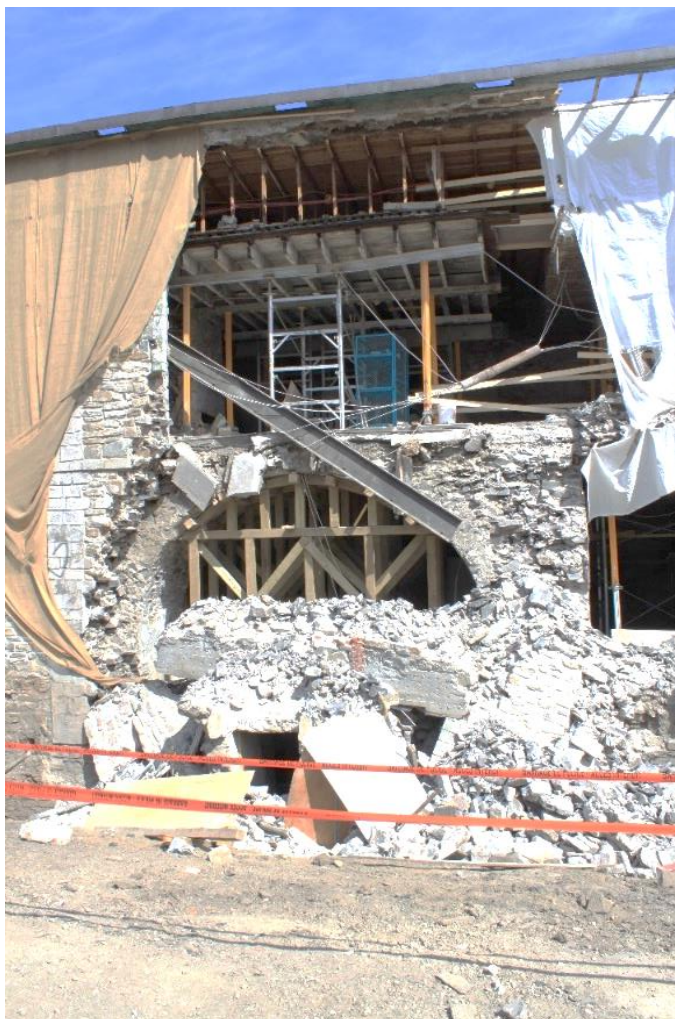


Photo 1 : Lieu de l'accident  
Source : CNESST

### **Abrégé des causes**

L'enquête a permis de retenir les causes suivantes pour expliquer cet accident :

- Le démantèlement de la fondation génère une surcharge de la maçonnerie et cause l'effondrement du mur sur les travailleurs.
- La méthode de travail utilisée pour le démantèlement de la fondation est inadéquate, elle n'assure pas la stabilité du mur.
- Le manque de planification des travaux de démantèlement des fondations ainsi qu'une supervision insuffisante entraînent l'utilisation d'une méthode de travail dangereuse.

### **Mesures correctives**

Dans le rapport d'intervention RAP1223758 émis le 14 mai 2018, la CNESST a ordonné la suspension des travaux sur le chantier ainsi qu'une interdiction d'accéder au périmètre de sécurité. La CNESST a exigé au maître d'œuvre une attestation de solidité et de sécurité du bâtiment. Il a également été demandé de mettre en place des méthodes de travail sécuritaires concernant les travaux de démantèlement de la maçonnerie.

Entre le 14 mai 2018 et le 19 décembre 2018, la reprise des travaux dans les blocs 4-3 et 2 est autorisée au fur et à mesure de l'obtention des attestations [...] confirmant la sécurité de chacun des blocs. Finalement, le 19 décembre 2018, la décision de suspension des travaux dans le bloc 1 est levée dans le rapport d'intervention RAP1248525. Des correctifs et des interventions visant à assurer la stabilité du bâtiment ont été effectués par le maître d'œuvre et ont été supervisés par [...] de WSP et de Douglas Consultants. Des attestations confirmant la stabilité et la sécurité du bâtiment ont été transmises par [...] de WSP et de Douglas Consultants.

Dans le rapport RAP1252850, la CNESST a également exigé à l'entreprise Briquetel Ltée d'identifier les risques ainsi que les mesures de prévention à mettre en place lors des travaux de démantèlement de la maçonnerie, notamment lorsque des portions d'ouvrage sont conservées au-dessus de la zone de démantèlement. Ces procédures ont été ajoutées au programme de prévention de l'entreprise.

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

## SECTION 2

### 2 ORGANISATION DU TRAVAIL

#### 2.1 Structure générale du chantier

**Tro-Chânes inc.** (ci-après appelé Tro-Chânes), entrepreneur général, est spécialisé dans le domaine de la réfection et de la réparation de structures de béton. Leurs bureaux sont situés à Québec et à Montréal. L'entreprise, qui emploie jusqu'à 150 travailleurs, a obtenu le contrat pour la réalisation des travaux de consolidation du bâtiment les Nouvelles-Caserne, phase 1. Tro-Chânes agit à titre de maître d'œuvre sur le chantier. Il planifie et coordonne les ressources nécessaires à la réalisation des travaux. Un chargé de projet est assigné au chantier. Celui-ci se déplace selon les besoins et lors des réunions. [ J ] est sur place à temps plein. Le nombre de travailleurs de Tro-Chânes présents sur le chantier varie selon les travaux à réaliser. Lors de l'accident, [ J ] et [...] travailleurs de Tro-Chânes sont présents. Le maître d'œuvre confie certains travaux en sous-traitance notamment ceux de maçonnerie. En effet, dans le cadre du projet, Tro-Chânes a octroyé un contrat en sous-traitance pour la réalisation des travaux de maçonnerie à l'entreprise Briquetal Ltée.

**Briquetal Ltée.** (ci-après appelé Briquetal), est un entrepreneur en maçonnerie spécialisé dans la restauration de bâtiments historiques. [ K ] est affecté au projet et passe régulièrement sur le chantier. [ I ] est présent à temps plein. Il veille à la répartition des travailleurs. Le 14 mai 2018, 19 travailleurs de Briquetal œuvrent sur le chantier de construction. Au total, il y a 22 travailleurs sur le chantier de construction le 14 mai 2018.

Tro-Chânes et Briquetal utilisent les services du [ H ] lorsque des plans ou des méthodes de travail sont requis dans le cadre de l'exécution des travaux.

La **Commission de la Capitale-Nationale du Québec** (ci-après appelée CCNQ) est le donneur d'ouvrage. Au moment de l'accident, le propriétaire du bâtiment est le Centre hospitalier universitaire de Québec (ci-après appelé CHU de Québec). Toutefois, un contrat octroie la responsabilité de la restauration du bâtiment à la CCNQ. La conception des plans pour le volet architecture est octroyée à STGM Architectes inc. (ci-après appelé STGM) et le volet structure est confié à WSP Canada inc. (ci-après appelé WSP). Des contrats de surveillance de chantier leur sont accordés. Les mandats sont notamment de s'assurer que les travaux et les matériaux respectent les plans et devis, l'échéancier et les coûts. Un chargé de projet de la CCNQ passe régulièrement pour constater l'avancement des travaux. D'autres professionnels et ministère sont impliqués dans le projet compte tenu de la nature historique et patrimoniale du bâtiment, dont une firme d'archéologie et le Ministère de la Culture et des Communications (ci-après appelé MCC). Ce dernier doit approuver les interventions sur le bâtiment étant donné que celui-ci est classé et inscrit au registre du patrimoine culturel. Dans le projet de consolidation du bâtiment des Nouvelles-Casernes, le MCC a le mandat d'émettre les permis et les autorisations concernant les travaux qui sont effectués. Il s'assure, notamment, que les méthodes utilisées permettent de conserver le plus possible les éléments caractéristiques du bâtiment. Parcs Canada est également impliqué dans le dossier puisqu'il est propriétaire de bâtiments et terrains adjacents au chantier et que des autorisations sont nécessaires afin que certaines parties soient utilisées dans le cadre des travaux.

La figure 1 présente la structure organisationnelle du projet.

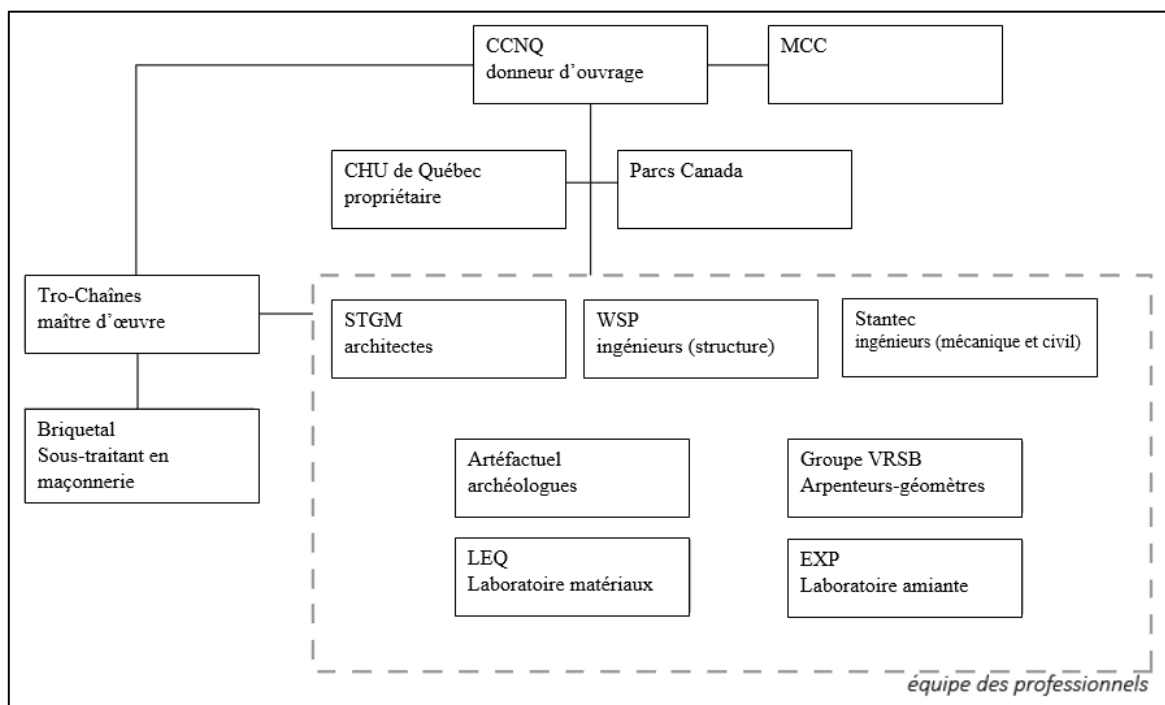


Figure 1 – Organigramme des intervenants sur le chantier

Source : Commission de la Capitale-Nationale du Québec (CCNQ) modifiée par la CNESST

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

### 2.2.1 Mécanismes de participation

**Tro-Chânes** remet au [ I ] les fiches d'engagement envers son programme de prévention et envers les règles de sécurité afin que ce dernier les fasse signer par ses travailleurs. Il n'y a pas de pause santé et sécurité ni de comité de chantier tenus par le maître-d'œuvre sur le chantier. Les rappels ou les discussions concernant la santé et sécurité du travail s'effectuent de façon verbale.

[ I ] de **Briquetal** effectue des pauses santé et sécurité aux deux semaines. Celles-ci permettent de rappeler les règles générales de sécurité (chute en hauteur, protection respiratoire, etc.). À leur première présence sur le chantier, les travailleurs sont accueillis par [ I ]. C'est à ce moment qu'ils signent l'engagement au programme de prévention du maître d'œuvre.

### 2.2.2 Gestion de la santé et de la sécurité

**Tro-Chânes** retient les services [ L ] afin d'accomplir certaines tâches liées à la santé et la sécurité du travail. Elle est notamment responsable de l'élaboration et de l'adaptation du programme de prévention aux différents projets, de la vérification des procédures de sécurité, de la réalisation d'audit, de la coordination de la formation des travailleurs, etc. Les travailleurs de



Tro-Chânes suivent des formations en santé et en sécurité, selon les besoins spécifiques des chantiers, telles que sur la protection respiratoire, la conduite de chariot élévateur, l'amiante, etc.

Un programme de prévention élaboré par Tro-Chânes est disponible sur le chantier. Il contient des mesures préventives relatives aux travaux de démolition, notamment concernant des mesures à mettre en place et des règles de sécurité présentées à la section 3.18 du *Code de sécurité pour les travaux de construction* (CSTC). Toutefois, le programme de prévention n'identifie pas les risques liés aux travaux de démolition qui nécessitent de conserver une portion d'ouvrage au-dessus des travaux (sous-œuvre).

Sur le chantier, [ I ] est responsable de la santé et de la sécurité. Ainsi, selon le programme de prévention du chantier, il doit accomplir les fonctions qui découlent de cette responsabilité, soit de s'assurer du port des équipements de protection individuelle, de former les travailleurs sur les méthodes et procédures de travail sécuritaires, de prendre des mesures concernant toute situation dangereuse et d'organiser des pauses sécurité tous les mois. Une procédure d'inspection des lieux de travail est appliquée par [ I ] mais sa fréquence n'est pas officiellement établie. La dernière inspection des lieux a été réalisée le 23 avril 2018. De plus, l'inspection avant départ des appareils de levage est effectuée par les travailleurs et consignée dans un registre.

[...]. Un programme de prévention est élaboré et disponible sur le chantier. Cependant, il n'identifie pas les risques liés aux travaux de maçonnerie, notamment ceux d'effondrement ou de chute de matériaux lors des travaux de démontage ou de démantèlement de la maçonnerie.

Les travailleurs de Briquetal suivent certaines formations en santé et en sécurité : conduite de chariot élévateur, protection respiratoire, etc.

## SECTION 3

### 3 DESCRIPTION DU TRAVAIL

#### 3.1 Description du lieu de travail

##### 3.1.1 Le chantier

Le chantier de construction est situé au 1, rue de l'Arsenal à Québec. Le projet, au coût de 7,9 millions de dollars, consiste en la phase 1 du projet de consolidation du bâtiment patrimonial nommé les Nouvelles-Casernes. Le projet se répartit en deux phases. La phase 1 comprend la partie ouest du bâtiment (blocs 1-2-3), soit la partie ayant conservé le plus d'éléments d'origine (datant de 1750). Plusieurs travaux sont prévus : rejointoiement, démantèlement et consolidation de certains murs de maçonnerie, réfection de la toiture du bloc 1, réfection de certaines voûtes et murs de refend (mur porteur intérieur), pose de tirants, etc. Les travaux ont débuté le 26 mars 2018.



Photo 2 – Bâtiment Nouvelles-Casernes – Identification des blocs  
Source : Google modifiée par la CNESST

Selon Environnement Canada, le 14 mai 2018 vers 13 h 00 à Québec, la température était de 22,7°C et la vitesse de vent était d'environ 24 km/h (annexe D).

##### 3.1.2 Bâtiment des Nouvelles-Casernes

Le bâtiment est classé « bien culturel » depuis 2012 et est inscrit au Registre du patrimoine culturel du Québec. Le bâtiment a été construit entre 1749 et 1752. Depuis plus de 50 ans, il est inoccupé et des travaux majeurs de consolidation sont requis. La longueur totale du bâtiment est d'environ 160 mètres et il est divisé en sept bâtiments (ci-après appelés blocs). Le bâtiment s'élève sur trois étages, en plus d'un sous-sol totalisant quatre niveaux. À l'origine, le niveau 1 (sous-sol) et le niveau 2 (rez-de-chaussée) étaient constitués de plusieurs voûtes dont certaines se sont effondrées au cours des dernières années.



Photo 3 – Bâtiment Nouvelles-Casernes – Blocs 1 à 3  
Source : CNESST

Le bloc 1 est divisé par 5 axes transversaux formant 4 sections appelées également locales. L'effondrement s'est produit plus spécifiquement au bloc 1 sur la façade sud du bâtiment entre les axes 3 et 4 (photo 4). La section de façade entre les axes 4 et 5 était déjà démolie au moment de l'évènement. La longueur totale du bloc 1 est de 28,13 mètres (92 pieds). Entre l'axe 3 et 4, la longueur est de 7,37 mètres (24 pieds). La hauteur totale de la façade sud est de 9,17 mètres (30 pieds) à partir du niveau 2 et de 12,17 mètres (40 pieds) à partir du bas de la fondation (niveau 1).

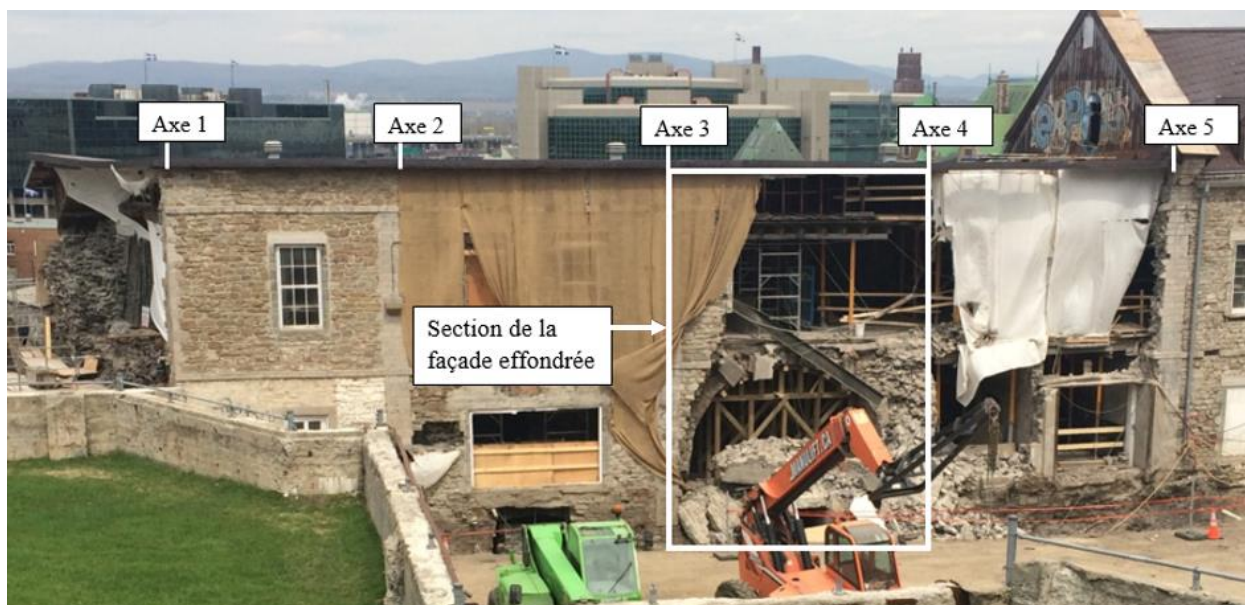


Photo 4 – Vue du bloc 1 et de la zone d'effondrement  
Source : CNESST

Le bâtiment est composé de 4 niveaux. Le niveau 1 correspond au sous-sol (fondation) et le niveau 2 au rez-de-chaussée et ainsi de suite (figure 2).

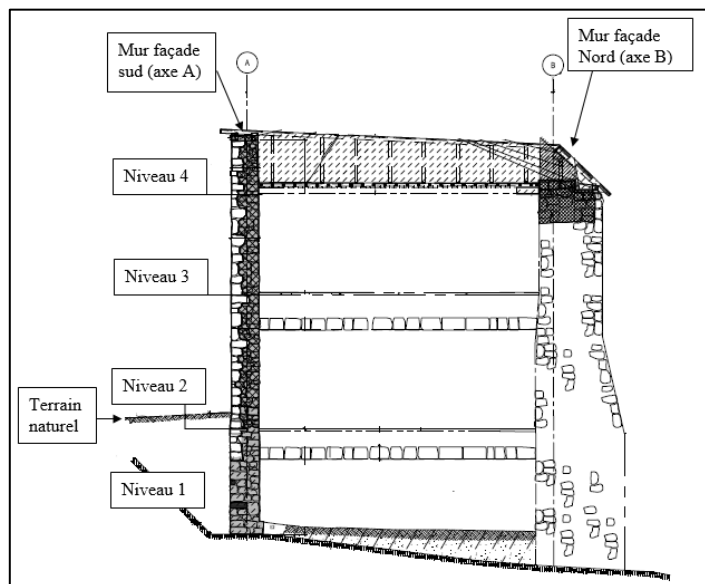


Figure 2 – Coupe transversale du Bloc 1 – Identification des niveaux  
Source : Commission de la Capitale-Nationale – plan structure modifiée par la CNESST

### 3.1.3 Le mur de la façade sud

Le mur de la façade sud est détaché des voûtes du niveau 1 et 2. De plus, selon [...] et [...], le mur était détaché des murs de refend (mur porteur transversal à la façade). Toutefois, à la suite de l'accident, certaines pierres de liaisonnement (boutisse) qui relie le mur de façade et certains murs de refend ont été observées (figure 3). Cependant, compte tenu de la dégradation des murs de maçonnerie, l'état du liaisonnement du mur de la façade avec les murs de refend devient complexe à apprécier<sup>1</sup>.

Le mur de la façade sud est un mur porteur. Il s'agit d'un mur massif en maçonnerie de pierre. Le mur combine différents types de pierre : moellon de grès brun (ou vert) pour le parement extérieur, moellon de calcaire schisteux (pierre calcaire de la Côte-de-Beaupré et/ou pierre de schiste noire) pour le noyau de mur et le parement intérieur. Des pierres de calcaire de Saint-Marc-des-Carières ou de la Côte-de-Beaupré composent certaines parties du mur, telles que les baies, les fenêtres, les jambes de force, les capucines, etc. L'épaisseur du mur de maçonnerie de la façade sud varie entre 850 mm et 972 mm. Un mur massif de maçonnerie est donc constitué d'un parement<sup>2</sup> extérieur en pierre, d'un noyau (pierres de moellons<sup>3</sup> et mortier déposés de façon arbitraire) et d'un parement intérieur.

<sup>1</sup> Tetra Tech. 2019. Expertise technique visant la compréhension de l'évènement du 14 mai 2018 au chantier des Nouvelles-Casernes – Phase 1.

<sup>2</sup> Parement : Surface apparente d'un ouvrage de maçonnerie ou revêtement en pierre d'un mur de blocage (source : Larousse).

<sup>3</sup> Moellon : « petite pierre de carrière [...] utilisées en remplissage ou en montage de mur ». (source : Alain Popinet).



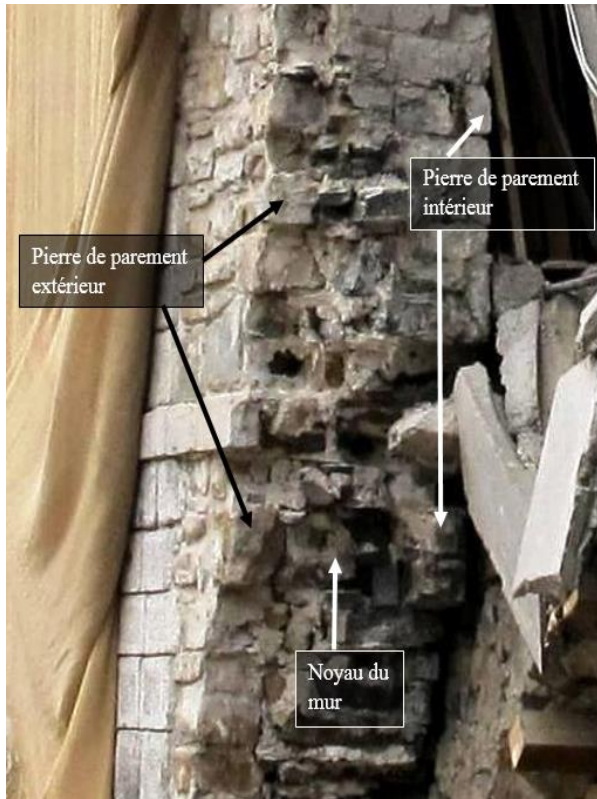


Photo 5 – Composition d'un mur massif  
Source : CNESST

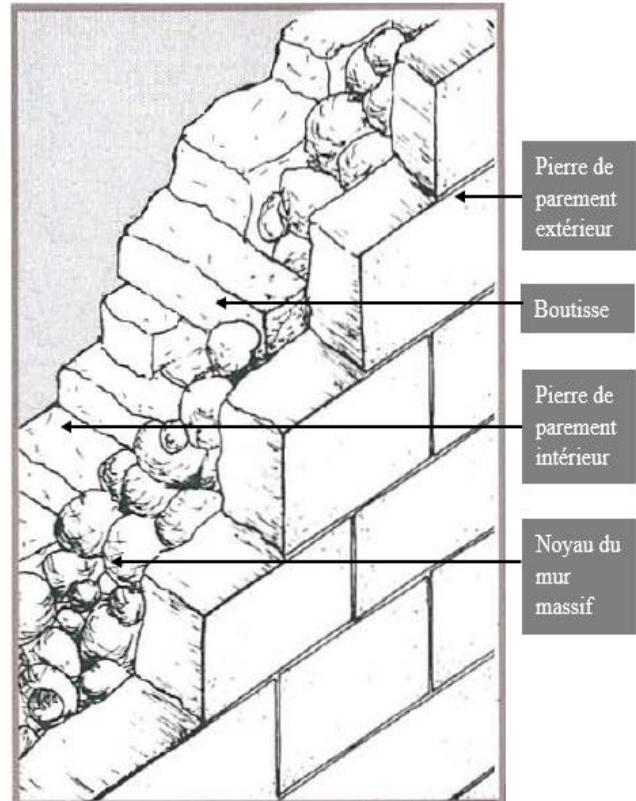


Figure 3 – Composition d'un mur massif  
Source : Ville de Québec modifiée par  
la CNESST

La façade sud entre les axes 3 et 4 possède quelques ouvertures dont une porte de garage et deux fenêtres (photo 6). Il y a également une ouverture dans le niveau 1 (photo 8). Celle-ci permet d'accéder à la voute, elle est appelée saut-de-loup<sup>4</sup> par les intervenants sur le chantier. L'ouverture créée par le saut-de-loup mesure 2,10 mètres en hauteur et 1,10 mètres en largeur. Un linteau<sup>5</sup> est situé au-dessus de la porte de garage du niveau 2. Le linteau est constitué de poutres d'acier recouvertes de béton (photo 7).

<sup>4</sup> Saut-de-loup : Fossé pour défendre l'entrée d'une propriété sans borner la vue ou pratiqué au pied d'un édifice (source : Grand dictionnaire terminologique) ou Ouverture placée au ras du sol, permettant à la lumière naturelle d'éclairer un sous-sol (source : Wiktionnaire).

<sup>5</sup> Linteau : Élément de la structure d'un bâtiment qui supporte les charges au-dessus d'une ouverture (source : Grand dictionnaire terminologique)

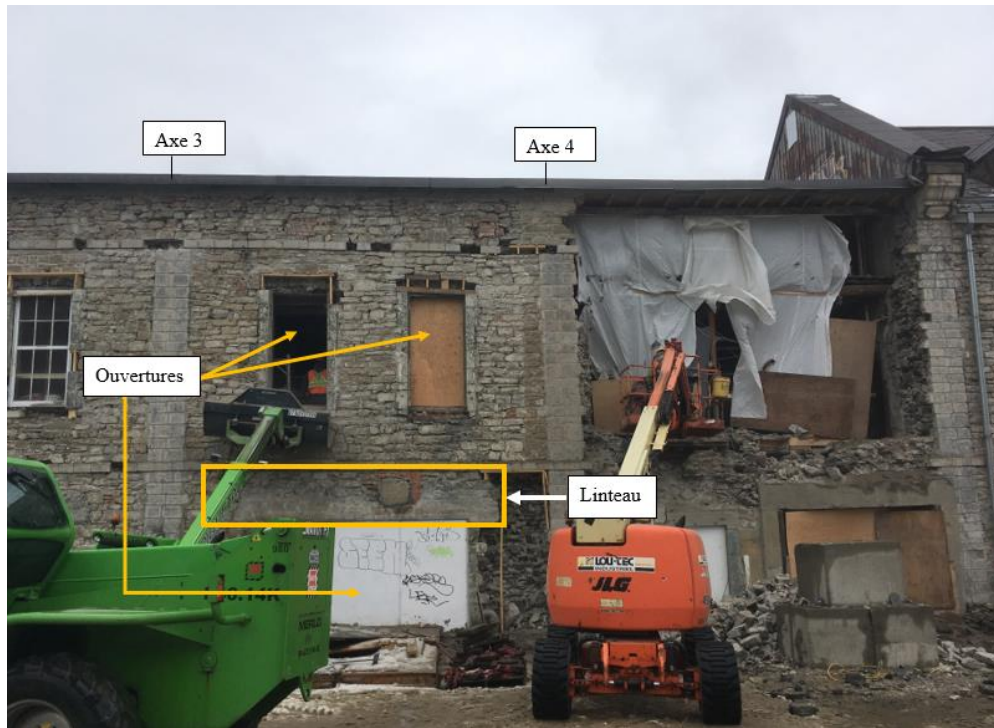


Photo 6 – Façade sud (niveaux 2 à 4) avant l'accident  
Source : Commission de la Capitale-Nationale modifiée par la CNESST



Photo 7 – Linteau  
Source : CNESST

### 3.2 Description du travail à effectuer

La compagnie Briquetal exécute les travaux de maçonnerie. Ces travaux représentent près de 80 % du projet de consolidation. Divers travaux de maçonnerie sont effectués simultanément dans les blocs 1 à 3 notamment la déconstruction et le remontage de murs complets, le démantèlement de portion de mur, le rejointoiement, etc. Les travaux de maçonnerie à effectuer sont identifiés aux



plans. Sur le mur de la façade sud, les travaux de maçonnerie sont débutés, certains sont terminés, d'autres sont en cours de réalisation et certains seront réalisés plus tard. Ainsi, avant l'accident, entre les axes 3 et 4 au niveau 2, deux zones du parement extérieur ont été reconstruites en récupérant en majorité les pierres de parements. Des travaux de rejointoiment ont également été effectués au niveau 3 et quelques pierres de parement ont été remplacées sur les différents niveaux. D'autres travaux sont prévus plus tard dans l'échéancier, notamment sur la portion intérieure du mur de la façade sud (noyau en pierre de moellon et parement intérieur) qui est pratiquement à refaire à partir du niveau 2 jusqu'au niveau 4.

Les fondations (niveau 1) de la façade sud du bloc 1, entre les axes 2 et 5, sont à refaire entièrement. Ceci implique que la maçonnerie des fondations doit être démantelée puis remontée et que la portion du mur située au-dessus doit rester en place lors de ces travaux (travaux à effectuer en sous-œuvre). Une portion de la fondation entre les axes 2 et 3 a déjà été démontée afin de laisser passer un équipement. Lors de l'accident, cette section est en cours de remontage par une équipe de maçons. Ainsi, le 14 mai 2018, les équipes sont réparties à différents endroits et ils effectuent divers travaux.

Une des équipes de travail, un apprenti-maçon et un manoeuvre spécialisé de Briquetal, s'affairent à démanteler la maçonnerie de la fondation (niveau 1) entre les axes 3 et 4 de la façade sud. Ces travaux de démantèlement ont débuté le vendredi précédent, soit le 11 mai 2018 par la même équipe. Préalablement au démantèlement, la zone de travail est excavée par Tro-Chânes afin de permettre l'accès aux fondations.



Photo 8 – Fondation (niveau 1) de la façade sud entre les axes 3 et 4  
Source : Contremaître Tro-Chânes (modifiée CNESST)

Pour réaliser les travaux de démantèlement, les travailleurs utilisent des marteaux pneumatiques (appelés à l'interne rivet buster) de marque Chicago Pneumatic, modèle CP4608P. Ce type d'outils est couramment utilisé pour le démantèlement de maçonnerie.



Photo 9 – Marteaux pneumatiques utilisés par les travailleurs  
Source : CNESST



Photo 10 - Marteaux pneumatiques utilisés par les travailleurs  
Source : CNESST

Une section d'un échafaudage à cadre métallique est également installée devant la zone de démantèlement (environ 5 pieds de hauteur).



## SECTION 4

### 4 ACCIDENT: FAITS ET ANALYSE

#### 4.1 Chronologie de l'accident

Le jeudi 10 mai 2018, des travaux d'excavation sont exécutés afin d'accéder à la fondation entre l'axe 3 et 4.

Le vendredi 11 mai en après-midi, les travaux de démantèlement des fondations débutent entre les axes 3 et 4. M. [ M ], apprenti-maçon et M. [ N ], manœuvre spécialisé, installent une section d'échafaudage à l'ouest de l'ouverture du saut-de-loup. [ I ] de Briquetal explique aux deux travailleurs les travaux à réaliser sur la fondation. Il indique la dimension et l'emplacement de la zone de démantèlement à effectuer et il précise la profondeur à respecter afin de ne pas atteindre la maçonnerie du mur de refend ou de la voûte. Les directives sont données verbalement sur place. Les deux travailleurs commencent donc le démantèlement de la fondation à l'ouest le vendredi 11 mai 2018. La journée de travail se termine et le démantèlement à l'ouest est avancée, mais n'est pas complétée puisque la présence de débris de maçonnerie nuit à l'avancement.

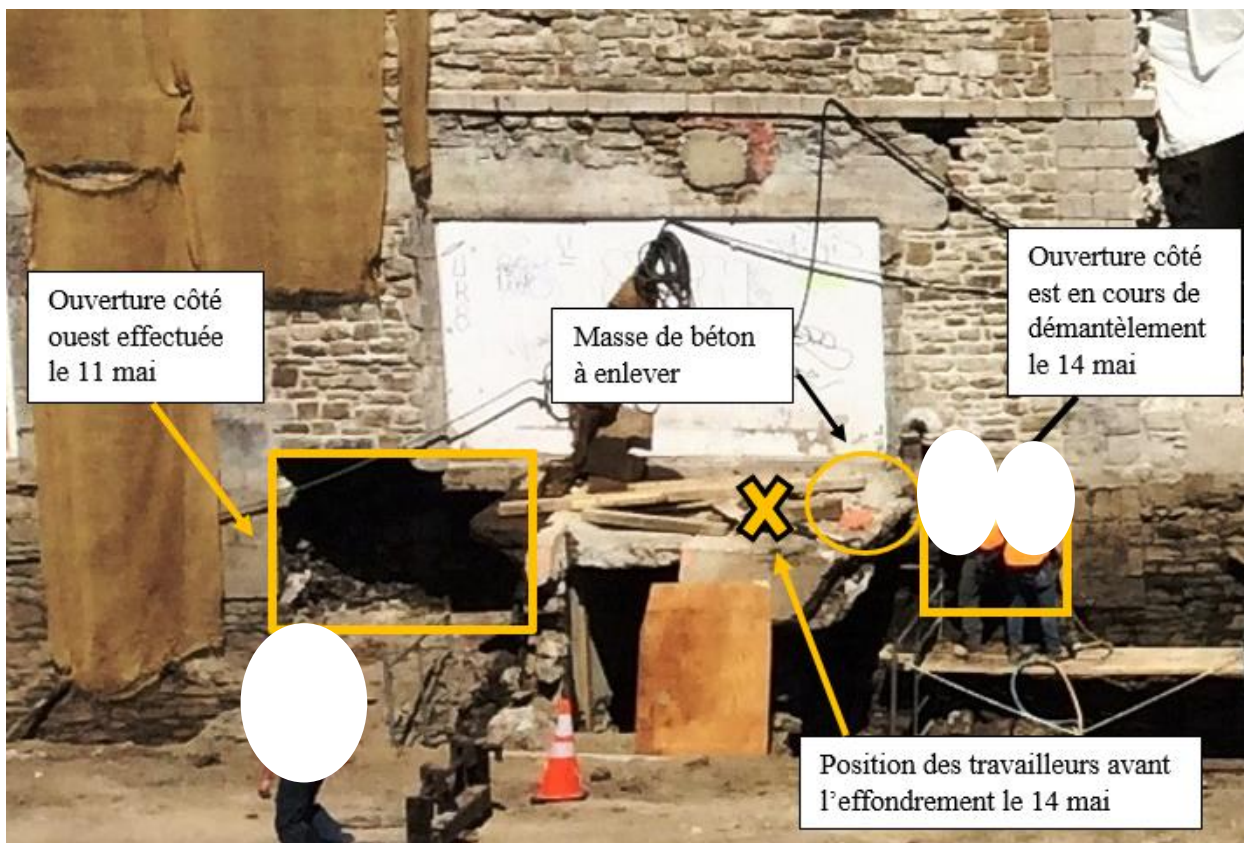


Photo 11 – Travaux effectués entre le 11 mai et le 14 mai 2018 sur la fondation  
Source : WSP modifiée par la CNESST

Le lundi 14 mai 2018, les deux travailleurs arrivent au chantier vers 6 h 30 et débutent vers 7 h 00. Ils doivent terminer les travaux au niveau de la fondation entre l'axe 3 et 4. L'apprenti-maçon s'installe pour terminer de démanteler la maçonnerie du côté ouest de l'ouverture. Il effectue les travaux de 7 h 00 à 9 h 15. Pendant ce temps, le manœuvre spécialisé s'affaire à vider des bacs de pierres ailleurs sur le chantier. Juste avant la pause de 9 h 30, les deux travailleurs installent une section d'échafaudage du côté est de l'ouverture. Préalablement, [ I ] explique et indique aux travailleurs les dimensions de la zone de démantèlement à effectuer dans la fondation du côté est.

Entre 9 h 30 et 12 h 00, les deux travailleurs démantèlent la maçonnerie de la fondation. Un peu avant le dîner, un des travailleurs demande au [ I ] de Briquetal s'il peut enlever la masse de béton située au-dessus de leur zone de travail. Cette masse repose dans le vide (en porte-à-faux) et les travailleurs la trouve instable. De plus, elle nuit à la progression des travaux puisque les travailleurs doivent poursuivre le démantèlement en se positionnant sous cette masse. [ I ] de Briquetal demande au [ J ] de Tro-Chânes la permission de démolir la masse. Les travailleurs obtiennent l'autorisation. Ils quittent pour le dîner et au retour vers 12 h 30, ils s'installent sur la dalle de béton et commencent à démolir la masse à l'aide de marteaux pneumatiques. Lors de ces travaux, les travailleurs remarquent que de la poussière tombe dans l'ouverture (côté est) effectuée en avant-midi. Rapidement des petites roches s'ajoutent et quelques instants plus tard, le noyau du mur se vide. À ce moment, les deux travailleurs sautent de leur position de travail et simultanément le mur s'effondre. Ils sont frappés par les débris et l'un d'eux est coincé puis est dégagé des débris. Les travailleurs sont transportés à l'hôpital. L'accident se produit vers 13 h 10.

## 4.2 Constatations et informations recueillies

### 4.2.1 État du bâtiment et de la maçonnerie du mur sud

Le bâtiment a plus de 260 ans. Durant ces années, il a été incendié à quelques reprises et a subi plusieurs modifications. Il a également fait l'objet de plusieurs études et analyses afin de documenter son état général ainsi que l'état de la maçonnerie. Il est inoccupé depuis 50 ans et laissé à l'abandon depuis une vingtaine d'années. Il n'est pas chauffé et son sous-sol (niveau 1) est souvent inondé. Le bâtiment n'a pas fait l'objet de restauration depuis les années 1974-1976 lorsque des travaux sur l'enveloppe extérieure ont été réalisés par Parcs Canada<sup>6</sup>.

Un rapport d'état de bâtiment a été réalisé par la firme Génivar en 2011 : *Étude sur le maintien d'actifs des Nouvelles- Casernes*. Cette étude signale l'état de dégradation avancée des murs de maçonnerie et des voûtes. Elle cible les raisons qui amènent cette dégradation, notamment l'exposition de la maçonnerie et du mortier à des « conditions [...] défavorables »<sup>7</sup>, telles que la présence d'eau et d'humidité en permanence dans le sous-sol, l'exposition aux cycles de gel et de dégel, etc. L'étude indique que sous l'effet de ces conditions, le mortier ne permet plus de bien lier les éléments de maçonnerie entre eux ce qui affecte l'intégrité des murs et diminue leur capacité à résister aux charges<sup>8</sup>. Concernant le mur sud, la maçonnerie du noyau du mur est dans un état de dégradation qui varie. Toutefois, les plans en structure prévoient la reconstruction quasi totale du noyau et du parement intérieur ce qui indique que le mur doit être consolidé et qu'il est

<sup>6</sup> Génivar. 2011. Étude sur le maintien d'actifs des Nouvelles- Casernes.

<sup>7</sup> Génivar. 2011. Étude sur le maintien d'actifs des Nouvelles- Casernes.

<sup>8</sup> Génivar. 2011. Étude sur le maintien d'actifs des Nouvelles- Casernes.

fragilisé. Il est à noter que les plans initiaux en structure prévoyaient la reconstruction globale du mur de façade sud, incluant le parement extérieur. Toutefois, la volonté de conserver les traces du passé ne permet pas d'autoriser la déconstruction complète du mur en partant du haut vers le bas.

Ainsi, les plans de structure sont ajustés en conséquence afin de limiter au maximum les démantèlements complets. Des communications ont lieu entre [...] et [...] afin de justifier les interventions qui nécessitent le démantèlement complet de la maçonnerie sur le bâtiment. Certaines versions de plan sont revues en ce sens et des travaux plus urgents sont ciblés. Des modifications à ce qui est prévu par [...] sont nécessaires afin que les travaux soient approuvés par le MCC et que le budget soit respecté. Il est connu que le bâtiment nécessite des travaux majeurs de consolidation et que, selon la CCNQ, dans les conditions actuelles, le bâtiment se dégrade rapidement.

L'état variable de la maçonnerie a également été noté par Tetra Tech QI inc. (ci-après nommé Tetra Tech)<sup>9</sup> qui souligne la présence de deux phénomènes de dégradation au niveau du mur sud. L'un touche l'état du mortier et l'autre la pierre du noyau du mur. Concernant le premier, la firme indique qu'« à plusieurs endroits, l'état du mortier présente des signes de dégradation » puisque les pierres de noyau du mur ne sont plus liées entre elles par le mortier. La deuxième concerne des pierres de noyau qui sont délaminées et fissurées. Selon Tetra Tech, la présence de pierres délaminées et fissurées n'est pas normale et « représente un signe de dépassement de contraintes causé par des surcharges ou des pressions interstitielles élevées amenées par les lentilles de gel ».

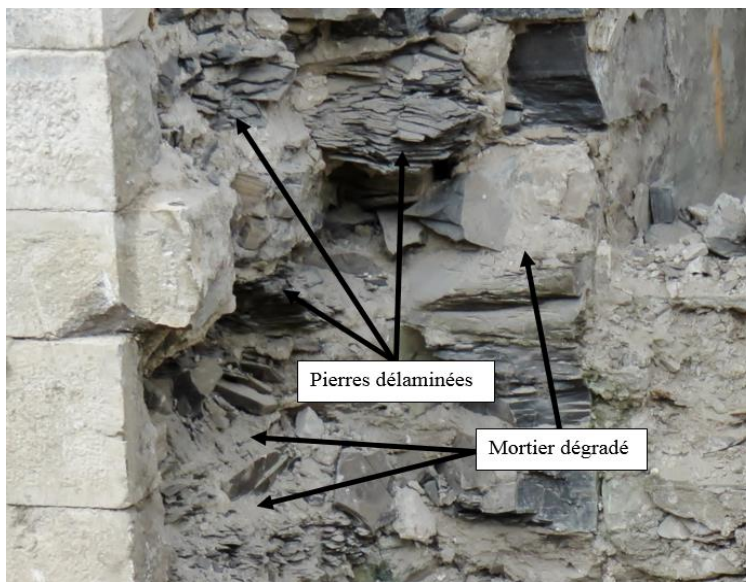


Photo 12 – Pierres délaminées et exemple de dégradation de mortier  
Source : CNESST

<sup>9</sup> La CNESST a confié un mandat d'expertise à la firme Tetra Tech concernant le volet technique de l'accident.



Ces deux phénomènes se développent sous l'effet des infiltrations d'eau et des cycles de gel et de dégel dans le noyau du mur. En effet, dans le cas du mortier, la présence d'eau « *lessive le mortier et élimine [...] les particules fines* »<sup>10</sup> ce qui peut affecter ses propriétés et entraîner le décollement du mortier sur les pierres. Dans le cas des pierres, l'eau s'infiltré directement à l'intérieur de celles-ci puis lorsque l'eau gèle, elles éclatent ou elles se fissurent.

Ainsi, sous l'effet de ces deux phénomènes, les composantes du mur sont modifiées et la résistance du mur dans son ensemble est affectée. Les conditions présentes dans le bâtiment (remontée d'eau, gel et dégel, etc.) ont donc un impact négatif sur la résistance offerte par la maçonnerie qui compose le mur.

De plus, lorsque les travailleurs ont démantelé la fondation entre les axes 3 et 4, ils ont constaté que la maçonnerie et le mortier étaient désagrégés (mortier en sable, pierres détachées du mortier, vide dans la maçonnerie, etc.). À plusieurs endroits, la démolition pouvait s'effectuer à la main ou au râteau. Lors du nettoyage de la zone d'effondrement et de la démolition des parties restantes de la fondation en septembre 2018, il a été possible de constater l'état de la maçonnerie des fondations.

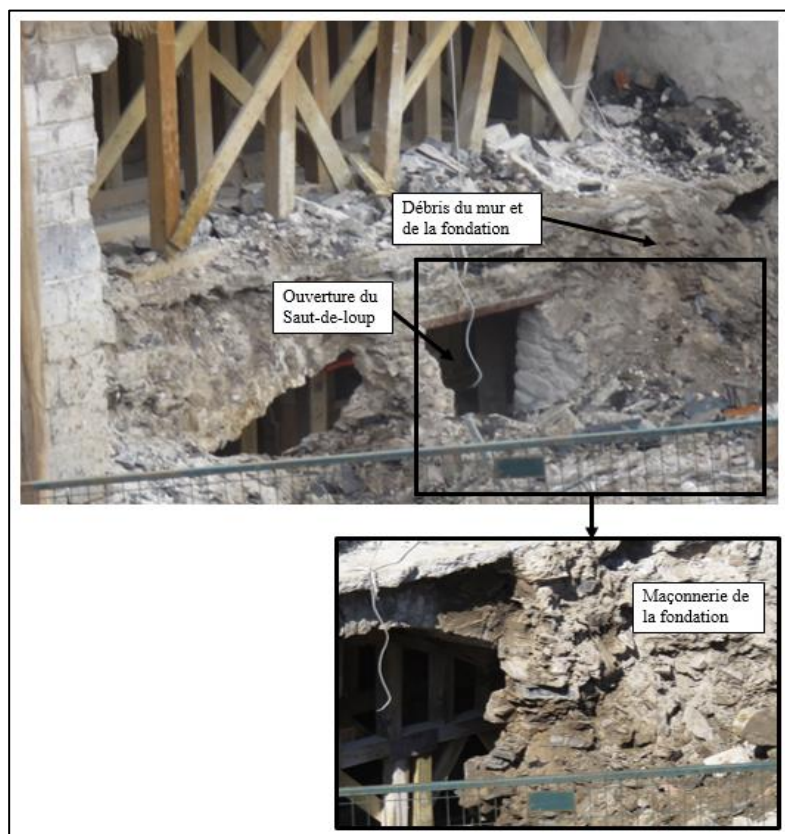


Photo 13 – Fondation entre l'axe 3 et 4 le 6 septembre 2018  
Source : CNESST

<sup>10</sup>Tetra Tech. 2019. Expertise Technique visant la compréhension de l'évènement du 14 mai 2018 au chantier des Nouvelles-Casernes – Phase 1.

#### 4.2.2 Travaux à réaliser sur la façade sud entre les axes 3 et 4

Les travaux à réaliser sur le mur de maçonnerie de la façade sud sont indiqués dans des documents différents : plans et devis d'architecture et de structure. En effet, le mur de la façade sud est divisé de façon théorique en deux parties : tous les travaux à réaliser sur le premier 450 mm d'épaisseur du mur (parement extérieur et partie du noyau du mur) sont traités dans les plans et devis d'architecture (STGM) et les travaux à réaliser sur la portion restante du mur de façade (noyau et parement intérieur) sont traités dans les documents en structure (WSP). De plus, les travaux à réaliser sur la fondation sont majoritairement traités dans les documents en structures. Ainsi, lors de la réalisation des travaux, deux plans doivent être consultés simultanément pour une même portion de mur. Le mur est donc divisé de façon théorique, le premier tiers est traité en architecture et les deux tiers restants sont traités en structure.

Comme l'objectif est de conserver un maximum du parement de la façade sud, les travaux en architecture sont précis et localisés. Entre l'axe 3 et 4, les travaux prévoient le remplacement de pierres, le rejointoiment et la restauration complète de deux sections de maçonnerie (photo 14). Sur ces deux sections, au niveau 2, les pierres de parement ainsi qu'environ 450 mm de moellon ont été démantelés puis remontés.

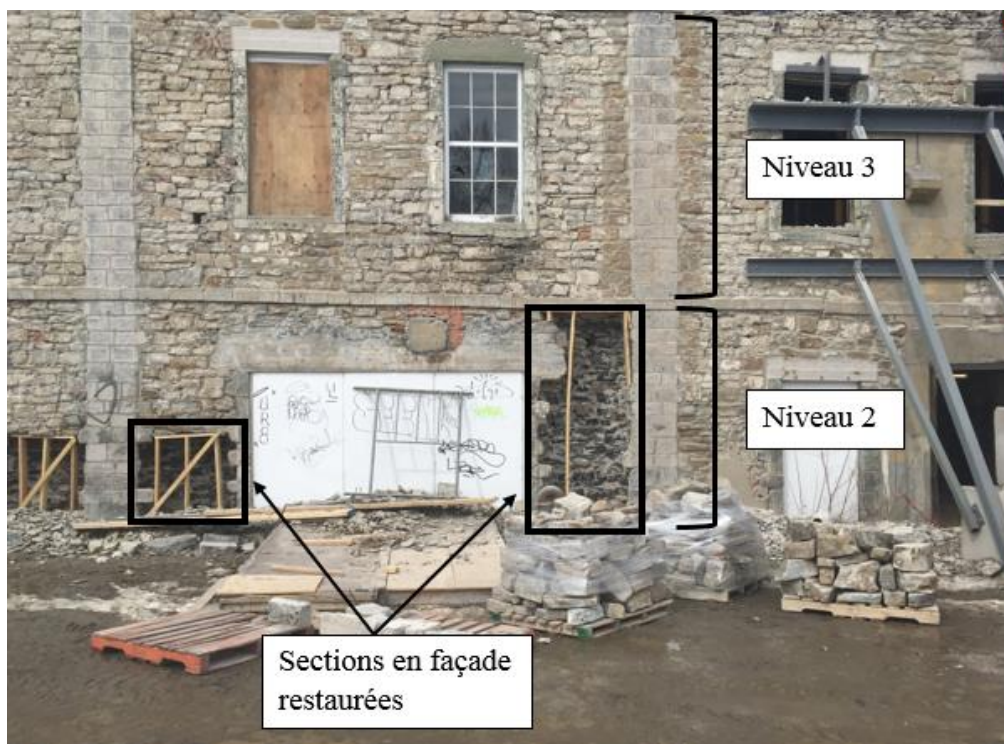


Photo 14 – Identification des deux sections restaurées avant l'accident entre l'axe 3 et 4  
Source : Commission de la Capitale-Nationale du Québec modifiée par la CNESST

Concernant les travaux de structure, le démantèlement et la reconstruction presque complète du noyau et du parement intérieur sont prévus. Au moment de l'accident, ces travaux ne sont pas commencés. De plus, en raison de l'état de dégradation des fondations, les plans prévoient leur

reconstruction complète. Ces travaux ont débuté le 11 mai et sont effectués avant la restauration du noyau du mur sud.

Les entrepreneurs expliquent cette façon de prioriser les travaux pour deux raisons. Premièrement puisqu'un enduit de surface doit être appliqué sur le revêtement extérieur de la façade sud et sur les fondations. Cette application requiert du temps, elle doit se faire à une température de plus de 10° C et elle doit être fait sur les blocs 1 à 3. Deuxièmement, l'entrepreneur en maçonnerie veut consolider les fondations afin de rebâtir la portion du mur intérieur sur des fondations solides. Une démolition complète du haut vers le bas n'est pas prévue puisque les travaux en architecture sont localisés.

#### **4.2.3 Méthode de travail utilisée pour le démantèlement de la fondation lors de l'accident**

Comme expliqué précédemment, l'ordre prévu des travaux implique le démantèlement et la reconstruction des fondations de la façade sud entre l'axe 2 et 5, et ce, avant la consolidation de la maçonnerie du noyau du mur sud. La méthode utilisée pour le démantèlement des fondations est une méthode nommée en « quinconce » par les travailleurs, [ I ] et [ K ] de Briquetal. Selon ceux-ci, cette méthode consiste à démonter une partie de l'ouvrage en maçonnerie qui ne doit pas être plus large que la profondeur de l'ouverture créée. Selon les explications fournies par [ K ] de Briquetal, plus l'ouverture est large, plus la hauteur doit augmenter afin d'obtenir un effet de voûte et une bonne redistribution des charges du mur. Une séquence doit être respectée de façon à laisser en place une partie du mur de maçonnerie non démontée d'environ le double de la largeur de la première ouverture. De cette façon, deux ouvertures peuvent être réalisées simultanément en laissant une portion d'ouvrage entre les deux. Cette façon de travailler permet aux maçons de démanteler partiellement la maçonnerie dans un mur (de créer des ouvertures) sans ajouter de support ou d'étaie<sup>11</sup> en vue de supporter les portions d'ouvrage situées au-dessus de l'ouverture pratiquée. La méthode en quinconce est une méthode utilisée sur d'autres chantiers et qui a déjà été attestée par [...]. Cette méthode est utilisée lors des travaux qui nécessitent de conserver une portion d'ouvrage au-dessus de la zone de démantèlement (sous-œuvre).

Sur le chantier des Nouvelles-Casernes, il a été discuté verbalement entre [ K ] et [ I ] de Briquetal d'utiliser la méthode en quinconce pour le démantèlement des fondations. La méthode n'est pas écrite et aucune attestation n'est obtenue d'un ingénieur. Ainsi, [ I ] détermine, en se basant sur ses expériences passées sur d'autres chantiers, les dimensions des ouvertures à créer dans la fondation afin de procéder au démantèlement selon cette méthode. Aucun document ou plan n'est annoté afin d'y inscrire les dimensions des ouvertures à pratiquer ainsi que la séquence.

Les travaux de démontage de la fondation débutent le vendredi 11 mai et se poursuivent le 14 mai. Au moment de l'accident, deux ouvertures sont créées. La dimension de l'ouverture à l'ouest est estimée à 6 pieds de largeur par 5 pieds de hauteur et entre 3 et 4 pieds de profondeur. La dimension de l'ouverture à l'est est approximativement de 3 pieds de largeur par 3 pieds de hauteur et de 2-3 pieds de profondeur. Ces deux ouvertures sont créées de chaque côté de l'ouverture déjà présente (saut-de-loup).

<sup>11</sup> Étaie : ouvrage de soutien temporaire d'une excavation ou d'une construction, destiné à reprendre les charges (Source : Devis de structure WSP)



#### 4.2.4 Détermination des besoins en étaielement lors des travaux de maçonnerie

Sur le chantier, [...] sont responsables de s'assurer de la mise en place des étaielements ou des dispositifs à mettre en place pour supporter la maçonnerie au-dessus d'eux lors des travaux de démontage partiel. Les différentes techniques et méthodes permettant de supporter la maçonnerie s'apprennent par [...]. S'il y a des besoins en étaielement, les consignes sont données verbalement. [ H ] peut être appelé selon les besoins et si la situation nécessite une validation. Toutefois, il n'y a pas de directive écrite concernant la mise en place d'étaielement ni d'indication donnée aux travailleurs et aux [ I et J ] leur permettant d'identifier les situations qui nécessitent l'approbation d'un ingénieur. Sur une photo prise le 13 mai 2018 (photo 15), il est possible de constater l'absence d'étaielement dans l'ouverture de la fondation à l'ouest du saut-de-loup.



Photo 15 – Ouverture dans la fondation sans support ou étaielement

Source : Ministère de la Culture et des Communications modifiées par la CNESST

#### 4.2.5 Formation professionnelle en maçonnerie

Les responsables de la formation professionnelle en Briquetage-Montage de l'École des métiers et occupations de l'industrie de la construction de Québec (ÉMOICQ) nous ont mentionné que la formation ne prévoyait pas d'information concernant la mise en place d'étaielement et que les techniques de restauration de mur massif en maçonnerie ne faisaient pas partie du programme. Ainsi, la méthode en quinconce n'est pas enseignée dans les centres de formation professionnelle offrant la formation en briquetage-maçonnerie.

Un complément à la formation professionnelle en briquetage peut être suivi, soit le cours Restauration de la maçonnerie, offert par l'école des métiers de la construction de Montréal. Cette formation n'est pas obligatoire pour les maçons œuvrant sur des chantiers de restauration. Dans ce cours, les techniques d'étaieiment, de démontage et de remontage de la maçonnerie sont enseignées aux étudiants. Toutefois, les personnes responsables de ce programme ont été contactées et ils nous ont indiqué que les méthodes de travail lors du démantèlement partiel d'un ouvrage en maçonnerie devaient être déterminées par un professionnel et non par les travailleurs. Les techniques de travail pour la mise en place d'étaieiment ou de support pour la maçonnerie sont enseignées dans cette formation. Cependant, les maçons n'apprennent pas à déterminer les méthodes de travail à utiliser lors de travaux en sous-œuvre mais à les appliquer.

#### 4.2.6 Description d'une méthode en quinconce/en alternance

Pour certains travaux de démontage dans un mur de maçonnerie, une méthode appelée « en quinconce » par les gens du milieu peut être utilisée. Cette méthode est aussi appelée méthode en alternance ou en bande colonne alternée. Celle-ci permet de procéder au démantèlement partiel de maçonnerie sans avoir à mettre en place des étaieiments ou des supports dans les ouvertures créées puisqu'elle permet de répartir les charges dans les sections de maçonnerie qui demeurent en place. Cette méthode de travail doit être adaptée à chaque ouvrage, selon le type de maçonnerie, son état, son appareillage et les ouvertures déjà présentes.

Selon Tetra Tech, une méthode de type « quinconce » se réalise en suivant un patron de démontage et de remontage de section de maçonnerie par alternance et en suivant une séquence établie. Ainsi, des sections de mur de maçonnerie sont laissées entre les autres sections démontées afin que les sections laissées en place reprennent la charge qui ne descend plus dans les sections déconstruites. Cette méthode nécessite de suivre une séquence de démontage régulière et, en général, d'une largeur équivalente à la largeur de la maçonnerie laissée en place, et ce, afin de ne pas excéder les contraintes qui sont admissibles dans la maçonnerie (mortiers et pierre).

Par exemple, sur la figure suivante, des fondations sont représentées et elles sont divisées par segments identifiés par des numéros. Les segments de maçonnerie portant les mêmes numéros seront démontés simultanément puis remontés avant de commencer le démontage de la maçonnerie des sections identifiées par les numéros suivants.

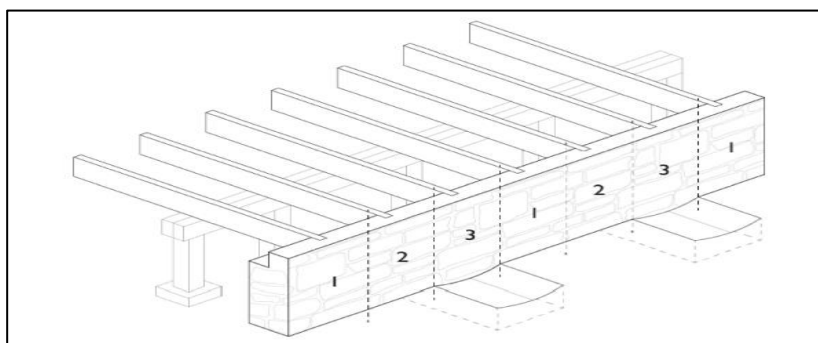


Figure 4 – Exemple du principe d'une méthode en alternance

Source : Action-Patrimoine



#### 4.2.7 Exigences des devis concernant les travaux de démantèlement de la maçonnerie

Des clauses concernant les travaux de démontage et remontage de la maçonnerie sont présentes dans les devis en structure et en architecture du projet. Les clauses exigent des méthodes de travail et des attestations notamment lorsqu'un ouvrage de maçonnerie au-dessus d'une zone de démontage doit demeurer en place.

Ainsi, dans le devis de structure, à la section 04 03 43 – *Ouvrages historiques – Démantèlement et reconstruction d'ouvrage en maçonnerie de pierres*, à la clause 1.6 du devis Structure, il est mentionné « *que les plans détaillés montrant les détails et les étapes de réalisation des travaux de démantèlement et de reconstruction* » doivent être fournis au consultant (dans ce cas-ci WSP) 10 jours avant le début des travaux. Un ingénieur, « *ayant de l'expérience dans la réalisation d'ouvrage historique en maçonnerie de pierre massive* », doit préparer et signer les plans. Les plans doivent spécifier les supports et les étaitements requis pour maintenir en place les portions d'ouvrages à conserver.

Il est également spécifié que : « *dans le cas où des portions d'ouvrage doivent être conservées et maintenues en place au-dessus des zones à démanteler, les étapes de réalisation doivent être planifiées en considérant des largeurs maximales d'intervention établies en fonction de l'état de la maçonnerie existante. Prévoir le nombre de visites requises de l'ingénieur de l'Entrepreneur.* »

La clause 3.4 de cette même section indique des précisions concernant les supports à mettre en place pour supporter l'ouvrage et/ou certaines parties de celle-ci lors de travaux de démantèlement. Une référence à la section 31 04 31 du devis est indiquée. Ainsi la section 31 04 31 du devis – *Ouvrages historiques étaielement/contreventement et reprise en sous-œuvre* spécifie certaines informations concernant les documents à remettre (notamment les attestations concernant les ouvrages temporaires).

Dans le devis d'architecture, des sections similaires sont présentes.

#### 4.2.8 [...] et [...] présents sur le chantier

Sur le chantier, plusieurs [...] et [...] sont présents. Concernant spécifiquement ceux impliqués pour les travaux de maçonnerie, il y a [...] (WSP et STGM) engagés par la CCNQ et il y a [ H ] engagé par Tro-Chânes et Briquetal pour certains besoins. Le rôle de chacun est différent et il sera décrit dans les deux sous-sections suivantes.

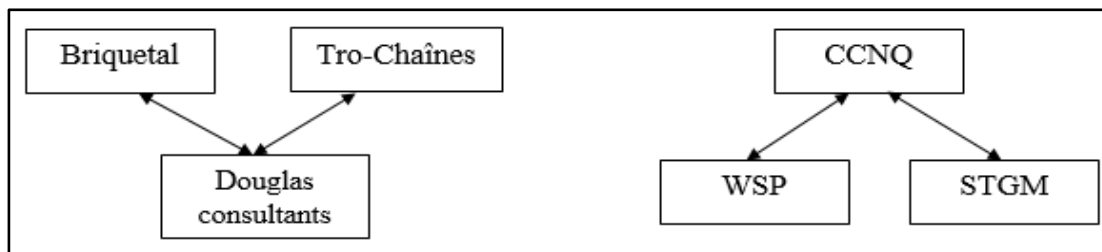


Figure 5 – Schéma représentant les différents professionnels  
Source : CNESST

#### **4.2.8.1 Rôle des professionnels engagés par le donneur d'ouvrage (CCNQ)**

[...] et [...] de WSP et STGM ont un rôle de surveillance sur le chantier permettant ainsi à la CCNQ de s'assurer de la qualité et de la conformité des travaux en fonction des plans et devis. En effet, ces derniers indiquent un « produit fini » ou un résultat que doit atteindre l'entrepreneur. Le mandat des professionnels n'est donc pas d'indiquer aux entrepreneurs les méthodes à utiliser, mais de s'assurer que le « produit fini » sera livré conformément aux plans et devis. L'entrepreneur a donc la responsabilité de déterminer les méthodes de travail et la séquence des travaux. Celui-ci doit s'adjoindre les services d'un ingénieur dont la responsabilité est d'attester les plans et les méthodes de travail pour accomplir certains types de travaux identifiés dans les devis.

Ainsi, [...] engagés par la CCNQ, [...], ont donc parmi leur rôle de recevoir les méthodologies ou les plans de l'entrepreneur pour les travaux indiqués dans les devis. Ils doivent accuser réception des divers documents envoyés et poser des questions si nécessaire.

Pour ce chantier, des plans et des attestations ont été reçus concernant l'étaieement gravitaire (plancher et toit) ainsi que pour quelques ouvertures dans le parement de maçonnerie. D'autres plans, méthodes et attestations étaient à recevoir ultérieurement. Toutefois, aucune méthode de travail, telle que le prévoient les devis, n'a été écrite et envoyée aux [...] concernant la méthodologie pour le démontage de la maçonnerie des fondations. Comme indiqué précédemment, le devis indique qu'une méthodologie est à prévoir lorsqu'une portion de mur demeure au-dessus de la démolition.

Par ailleurs, les documents reçus et à recevoir par [...] sont indiqués dans des tableaux de suivi. Cependant, la méthodologie du démantèlement des fondations n'était pas indiquée dans ce tableau. Les méthodes de travail sont également discutées verbalement sur le chantier.

De plus, en cours de chantier, il a été rappelé par STGM que les étaieements et les méthodes de travail devaient être prévus par l'entrepreneur et que ces aspects ne relevaient pas des [...].

#### **4.2.8.2 Rôle de [ H ] de Tro-Châînes et Briquetal**

Comme mentionné précédemment, Tro-Châînes et Briquetal utilisent les services [ H ] de la firme Douglas Consultants.

Tro-Châînes a retenu les services de [ H ] afin qu'il soumette des plans et des attestations pour assurer la reprise des charges transmises par les planchers et le toit dans les murs du bâtiment. Ce volet est appelé étaieements "gravitaires" par les gens sur le chantier.

Au moment de l'accident, les planchers et le toit du bâtiment sont étayés. Les étaieements ont été mis en place selon les exigences de [ H ]. Le mur de la façade sud ne supporte donc plus les charges créées par le poids du toit et des planchers.

Selon les informations recueillies, tout ce qui touche la reprise des charges du bâtiment est sous la responsabilité de Tro-Chânes et tout ce qui concerne les ouvertures dans les murs et les supports de la maçonnerie est sous la responsabilité de Briquetal. Cette entente s'est effectuée de façon verbale.

Concernant les étaitements des ouvertures dans les murs de maçonneries ou pour le parement extérieur de la maçonnerie, [ H ] a été engagé par Briquetal afin de produire des attestations pour la mise en place d'étaitements. [ H ] est appelé au besoin en fonction de l'avancement du chantier. Aucun contrat ou entente n'est signé concernant le nombre de visites ou les besoins.

Un rapport de [ H ] intitulé « *Inspection des étaitements temporaires* » est disponible et a été effectué avant l'accident. Ce rapport traite du parement pour quelques ouvertures qui ont été pratiquées dans le mur de la façade sud. La méthodologie de travail pour le démontage et le remontage n'est pas indiquée. Une note dans le document de [ H ] indique que ce rapport peut servir de plan typique. Toutefois, les étaitements supportent le parement extérieur et concernent les travaux effectués sur la portion architecturale du mur (photo 14, page 17). Cette attestation est envoyée au maître d'œuvre par l'entrepreneur en maçonnerie à la suite d'une demande écrite formulée par Tro-Chânes par le biais d'un courriel envoyé le 19 avril 2018.

#### **4.2.9 Étaitements et séquence de travail proposés au plan structure du projet**

Dans les plans de structure, pour les travaux de démolition de la façade sud, une méthodologie de travail pour le démantèlement de la fondation est proposée. Des plans d'étaitements ainsi qu'une séquence de travail afin d'installer l'étalement temporaire sont présentés.

Ainsi, sur le plan S5.04, à la coupe présentée au schéma 31-S1-01 - *Démolition étalement proposé*, il est proposé d'installer des étaitements temporaires au-dessus du mur de fondation à démanteler, et ce, afin de supporter la maçonnerie demeurant en place au-dessus de la zone de démolition (voir figure 6). Ainsi, l'ajout d'étalement temporaire constitué de poutres d'acier en « H » est identifié dans ce détail et il est proposé d'installer les poutres en deux séquences.

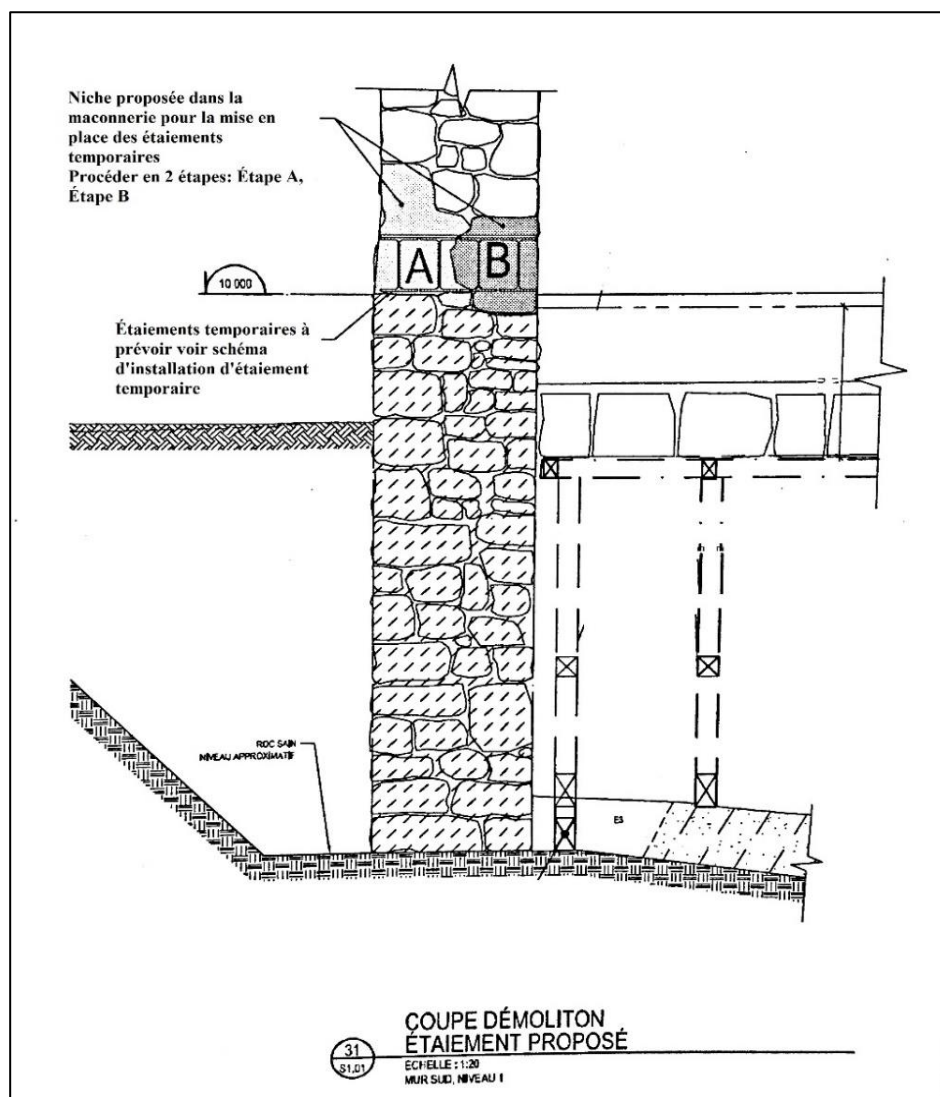


Figure 6 – Mise en place d'étaielement temporaire (extrait plan de structure (S5-04))  
Source – CCNQ modifiée par la CNESST

De plus, dans ce même détail, il est indiqué qu'une méthode d'installation de l'étaielement temporaire doit être prévue. Un schéma est proposé dans le plan, mais il est indiqué que les longueurs sont « à déterminer par [ O ] en fonction de l'état de la maçonnerie existante ». La méthodologie proposée combine une méthode de démontage en « bande colonne alternée » avec la mise en place d'étaielement temporaire (voir figure 7).

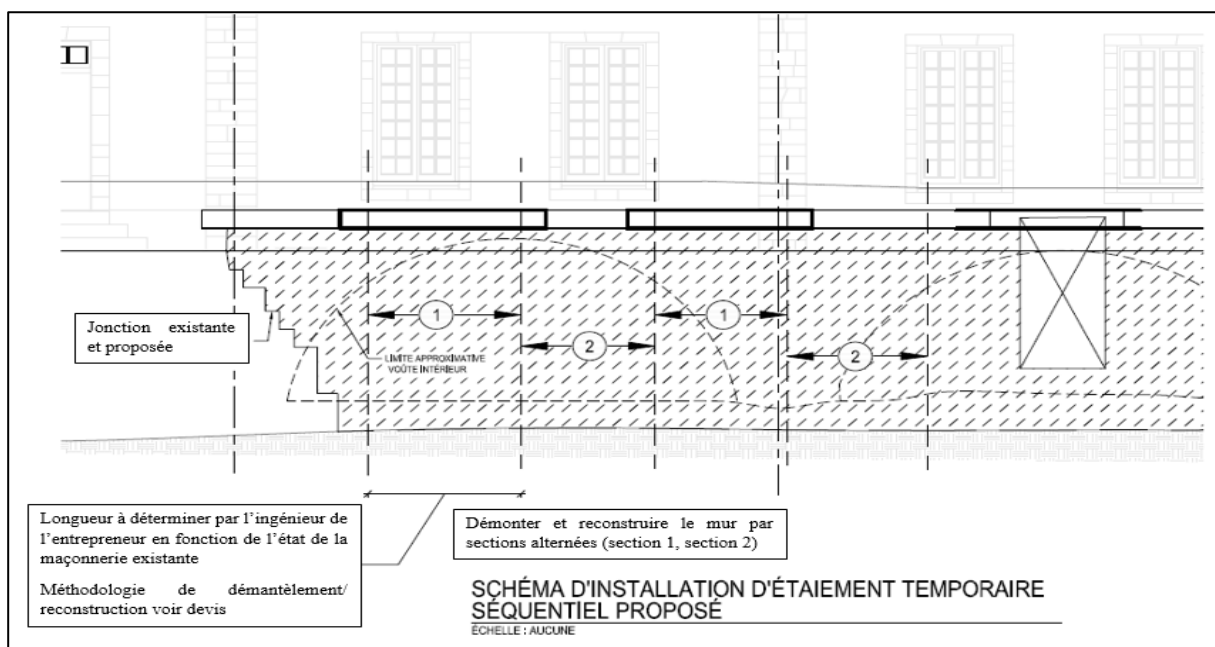


Figure 7 – Étaie temporaire et séquence de démantèlement proposés au plan structure  
Source : CCNQ modifiée par la CNESST

Selon WSP, ces détails sont ajoutés au plan afin de permettre aux entrepreneurs de saisir la portée des travaux, de mieux estimer les coûts des travaux et de fournir les soumissions en conséquence. Le choix de leur méthodologie leur revient toutefois.

[ P ] nous a indiqué qu'un plan typique pour le démantèlement de la fondation était présenté aux plans, mais il n'a pas été en mesure de le retrouver. Aucun représentant de l'entreprise en maçonnerie ne nous a parlé de ces éléments qui étaient au plan.

#### 4.2.10 Échéanciers

L'échéancier du chantier est sous la responsabilité du Tro-Chânes. Cependant, il a été établi conjointement avec Briquetal concernant la portion des travaux de maçonnerie. Trois versions ont été remises aux [...] et au client par le maître d'œuvre. Au moment de l'accident, l'échéancier final n'est pas approuvé par [...]. Il demeure des éléments à y intégrer, notamment concernant du temps d'arrêt à prévoir pour l'archéologie. Dans les trois versions émises avant l'accident, les travaux de démantèlement des fondations du mur de la façade sud sont prévus pour le mois de mai 2018. Dix jours sont prévus pour la démolition des fondations de la façade avant.

Version de l'échéancier	Date début	Date de fin
Initial	15 mai 2018	29 mai 2018
2018-04-16	8 mai 2018	18 mai 2018
2018-04-30	1 <sup>er</sup> mai 2018	5 juin 2018

Figure 8 – Résumé des trois versions de l'échéancier pour la démolition de la fondation  
Source : CNESST

Certains travaux sont en attente de directives de la part des [...] et du client. Toutefois cela n'influence pas l'ordre des travaux prévus concernant la démolition de la fondation.

Des commentaires ont été faits par les [...] concernant certains aspects de l'échéancier, notamment, l'ordre de réalisation des travaux. La façon de procéder est d'envoyer tous les commentaires au [ Q ] afin que celui-ci fasse suivre les commentaires dans un seul courriel au maître d'œuvre. [ Q ] de WSP note comme principale problématique concernant les échéanciers :

*« L'excavation extérieure est réalisée à l'intérieur de la période des activités de démontage et de reconstruction de la maçonnerie ouest et sud ». [ R ] questionne donc si « l'entrepreneur a considéré que la stabilité et l'intégrité des murs, notamment le mur sud, sont affaiblies par leur état de dégradation et qu'il pourrait être avantageux concernant la sécurité de faire le démontage et [la] reconstruction des portions hors-sol avant de procéder à l'excavation et la réflexion des fondations? ».*

Ce courriel n'a toutefois pas été transmis intégralement au maître d'œuvre étant donné que tous les commentaires sont regroupés dans une seule communication. Le commentaire émis par WSP est résumé, mais sa portée est modifiée puisque le sujet a été jumelé avec d'autres commentaires.

#### **4.2.11 Rapport d'expertise Tetra Tech – Explication de la rupture**

La CNESST a confié un mandat d'expertise technique à la firme Tetra Tech inc. À la suite de cette expertise, la firme conclut que la rupture du mur provient d'un manque de résistance en compression ou en cisaillement de la maçonnerie au point d'appui du linteau et de l'effet de décohérence créée par les vibrations des différents équipements ou outils à proximité.

Deux normes ont été utilisées afin d'établir les valeurs de la résistance de la maçonnerie en compression et en cisaillement : ASCE41-06 (SEISMIC REHABILITATION OF EXISTING BUILDINGS) et la norme CSA S304-14 (CALCUL DES OUVRAGES EN MAÇONNERIE). Ainsi la résistance en cisaillement de la maçonnerie est établie à 0,09 MPa et la résistance en compression à 0,7 MPa.

Trois analyses de rupture ont été effectuées par la firme :



- Rupture en compression (contrainte sous l'appui du linteau) :



Photo 16 – Rupture en compression  
Source : WSP modifiée par Tetra Tech

- Rupture d'une ligne de cisaillement à gauche du linteau :



Photo 17 – Ligne de rupture en cisaillement  
Source : WSP modifiée par Tetra Tech

- Rupture en cisaillement à droite du linteau :



Photo 18 – Rupture en cisaillement  
Source : WSP modifiée par Tetra Tech

Les résultats des trois analyses établissent que les valeurs de référence établies dans les normes pour la résistance en maçonnerie sont plus grandes que les contraintes estimées de la charge appliquée dans la maçonnerie. Néanmoins, les valeurs obtenues sont près des résistances limites de référence. En effet, la contrainte en compression est 0,63 MPa, par rapport à une résistance de 0,7 MPa. Concernant la rupture en cisaillement à l'est du linteau (photo 17), la résistance en cisaillement d'un mur de maçonnerie est établie à 0,09 MPa et les calculs démontrent que la contrainte de cisaillement est de 0,082 MPa, ce qui établit que la résistance est seulement 10% supérieure à la charge appliquée. Pour ce qui est de la rupture en cisaillement à l'ouest du linteau, la contrainte de cisaillement est de 0,08 MPa.

Les valeurs de référence des normes ne prennent pas en compte les conditions auxquelles la maçonnerie est exposée lors des travaux, telles que les vibrations. En effet, celles-ci ont tendance à créer de la microfissuration dans la maçonnerie et dans les joints de mortier entraînant une décohésion qui affecte la résistance de la maçonnerie du mur. La firme indique que les vibrations ont davantage un impact défavorable sur la résistance en cisaillement que sur la résistance en compression.

Sur le chantier, les vibrations sont induites par les différents équipements tels que des marteaux pneumatiques, des marteaux perforateurs électriques, des pelles mécaniques, des chariots élévateurs, etc. Selon Tetra Tech, l'utilisation de ces équipements est usuelle et nécessaire sur ce type de chantier. Tetra Tech indique que l'utilisation de ces outils est incontournable mais que c'est davantage le concept d'intervention en deux phases sur le mur (portion architecturale et structurale) qui entraîne le plus d'impacts défavorables des vibrations. En effet, cela fait en sorte que les vibrations occasionnées par les travaux se propagent dans la maçonnerie adjacente, ce qui affecte l'intégrité du mur. Ainsi, lors de la déconstruction des murs de refends aux axes 4 et 5 et de la maçonnerie du mur sud au niveau 2, les vibrations ont forcément eu un impact négatif dans le massif du mur sud diminuant ainsi la résistance de la maçonnerie.

Tetra Tech conclut donc que les contraintes induites à l'appui du linteau ont été plus grandes que la résistance résiduelle de la maçonnerie.

#### **4.2.12 Formation et expérience des travailleurs et [ I ] de Briquetal**

L'apprenti maçon est employé par Briquetal depuis [...] ans. [...].

Le manoeuvre spécialisé est employé par Briquetal depuis [...] ans. [...].

[ I ] possède environ [...] années d'expérience dans le domaine de la maçonnerie. [...].



#### 4.2.13 Extrait d'ouvrages et d'article concernant la maçonnerie traditionnelle

Dans un ouvrage traitant de la maçonnerie traditionnelle, l'auteur indique que les interventions sur un bâtiment de maçonnerie, notamment dans les murs porteurs, ont un impact sur la structure et que ces interventions doivent être bien encadrées et suivies. Certaines interventions peuvent susciter des dommages au bâtiment puisqu'elles peuvent modifier le cheminement des charges dans la structure<sup>12</sup>. L'auteur cite comme exemple la création d'ouvertures en façade d'un bâtiment en maçonnerie et il indique que cela entraîne une modification dans la descente de charge. Une évaluation des impacts entraînés par la modification de la descente de charge doit être réalisée avant d'effectuer l'intervention<sup>13</sup>. Ainsi, lors de la création d'une ouverture dans un mur de maçonnerie, il est conseillé de mettre en place des appuis verticaux afin de répartir la charge ailleurs que dans la maçonnerie existante et de bien répartir celle-ci sous les appuis<sup>14</sup>. Le même principe s'applique lors de la création d'une ouverture pour appliquer une méthode en quinconce.

Dans un autre ouvrage traitant de la maçonnerie traditionnelle<sup>15</sup> et notamment de la reprise en sous-œuvre des murs, il est indiqué que « *lorsque la maçonnerie est en bon état et que le liant est résistant* », une ouverture peut être créée sans étaielement. Toutefois, d'autres aspects doivent être étudiés (dimensions des ouvertures à créer, ouvertures déjà présentes, etc.) et les travaux planifiés en conséquence. Pour les techniques qui nécessitent de l'étaielement, il est indiqué que « *l'étaielement [doit être] choisi en fonction des interventions prévues et de l'état de maçonnerie* »<sup>16</sup>.

De plus, plusieurs ouvrages<sup>17 18</sup> indiquent que pour entamer des travaux en sous-œuvre ou de réparation de fondation, de nombreuses données doivent être prises en compte et évaluées afin de planifier la méthode d'intervention. Les ouvrages indiquent également qu'il est nécessaire que l'évaluation et la planification soient effectuées en collaboration avec des personnes d'expérience, notamment des ingénieurs ayant de l'expérience en maçonnerie traditionnelle ou bâtiments patrimoniaux.

<sup>12</sup> POPINET, Alain. *Traité de la maçonnerie ancienne – Calculs – matériaux – Diagnostic et réhabilitation*. Éditions LeMoniteur. P. 284-285.

<sup>13</sup> Idem. P.285

<sup>14</sup> Idem p. 333

<sup>15</sup> Association Ouvrière Des Compagnons Du Devoir Du Tour De France. *La Maçonnerie et la Taille de Pierre*. Les compagnons du savoir. Tome 6. *Les murs, les ouvertures et les éléments de stabilité*. P. 506.

<sup>16</sup> Idem. P. 498

<sup>17</sup> ADDISON, John. *Underpinning*. [ <https://www.buildingconservation.com/articles/underpinning/underpinning.htm> ]. (Consulté le 14 novembre 2018)

<sup>18</sup> ALMEIDA de. Joao Manuel. Stabilisation de murs en réhabilitation. 2012. <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01234632/document> (Consulté le 13 novembre 2018). P. 17-18.

#### 4.2.14 Loi sur la santé et sécurité du travail

Selon l'article 51 de la Loi sur la santé et la sécurité du travail (L.R.Q., c. S-2.1), l'employeur doit prendre les mesures nécessaires pour protéger la santé et assurer la sécurité et l'intégrité physique du travailleur. Il doit notamment :

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

De plus, selon l'article 196, de la *Loi sur la santé et la sécurité du travail* (L.R.Q., c. S-2.1), le maître d'œuvre doit respecter au même titre que l'employeur les obligations imposées à l'employeur par la présente loi et les règlements. Il doit notamment prendre les mesures nécessaires pour protéger la santé et assurer la sécurité et l'intégrité physique du travailleur de la construction.

#### 4.2.15 Code de sécurité pour les travaux de construction

La section 3.18 du **Code de sécurité pour les travaux de construction** (S-2.1, r.4) définit des règles à respecter avant, pendant et après les travaux de démolition. Voici un extrait de certaines règles de sécurité indiqué dans cette section :

- Tout bâtiment ou partie de bâtiment en démolition doit être solidement étayé ou soutenu afin d'éviter tout danger d'écroulement (3.18.1.4).
- La démolition doit s'effectuer systématiquement depuis le toit jusqu'au sol, à moins qu'un autre procédé de démolition n'ait été approuvé par un ingénieur (3.18.2.2 a)).
- Aucune poutre, colonne ou autre élément de charpente ne peut être coupé ou détaché des autres sans avoir été libéré auparavant de tout ce qu'il supporte (3.18.2.2 d)).
- La démolition de la maçonnerie doit s'effectuer par couche à peu près de niveau et non par masses afin de ne pas diminuer la solidité de la charpente et des supports (3.18.2.2 f)).
- Il faut assurer une surveillance constante pendant le cours des travaux afin de prévenir les accidents (3.18.2.2 j)).

De plus, l'article 3.18.6 spécifie que « *les articles 3.18.1, 3.18.2 et 3.18.5 s'appliquent à tous les types de démolition.* »

### 4.3 Énoncés et analyse des causes

#### 4.3.1 Le démantèlement de la fondation génère une surcharge de la maçonnerie et cause l'effondrement du mur sur les travailleurs.

Lors de l'accident, les planchers et le toit sont supportés par des étalements temporaires qui sont installés conformément aux directives [...] et attestés par celui-ci. Les charges des planchers et du toit ne sont donc plus transmises dans le mur de façade sud. Le mur supporte seulement son propre poids.

Les travaux de démontage de la fondation sont prévus au plan et à l'échéancier. Pour effectuer le démontage de la fondation entre l'axe 3 et 4 de la façade, l'entrepreneur en maçonnerie décide d'appliquer une méthode de démontage en alternance (appelée en quinconce). Les travaux débutent le vendredi 11 mai 2018 et se poursuivent le 14 mai 2018. Deux ouvertures sont alors créées dans les fondations de chaque côté de l'ouverture existante (saut-de-loup).

En créant ces deux ouvertures, le mur est privé d'une grande partie de sa fondation. Cela entraîne donc une modification dans la descente des charges. En effet, la charge, créée par le poids du mur de maçonnerie, ne peut plus descendre dans les fondations. Elle est alors concentrée aux appuis du linteau de béton. Cette charge génère des contraintes dans la portion restante de maçonnerie qui subit également diverses vibrations provenant notamment de la démolition adjacente et de la circulation de machinerie. Ainsi, lors de l'évènement, la maçonnerie du mur n'est plus en mesure de soutenir le poids du mur et cela entraîne une rupture et l'effondrement de ce dernier.

Selon les conclusions de Tetra Tech, les contraintes de cisaillement créées par la charge provenant du linteau sont de 0,082 MPa ou 0,08 MPa. La résistance en cisaillement pour ce type de maçonnerie est établie à 0,09 MPa dans les normes. Ainsi, la valeur de résistance de la maçonnerie établie dans les normes est seulement 10% supérieure à la charge appliquée dans la maçonnerie.

Cependant, ces valeurs de résistance de maçonnerie établies dans les normes ne prennent pas en compte les conditions auxquelles la maçonnerie est exposée lors des travaux notamment les vibrations occasionnées par les travaux adjacents à la façade. Sur le chantier, les vibrations sont principalement causées par l'utilisation des outils de déconstruction, la présence de machinerie sur le chantier, etc. Ces vibrations ont un impact défavorable sur la résistance en cisaillement de la maçonnerie. Elles occasionnent de la microfissuration dans la maçonnerie et dans les joints de mortier ce qui accélère la séparation entre le mortier et les pierres. Ce phénomène de décohéation affecte la résistance de la maçonnerie. Conséquemment, la résistance réelle au moment de l'accident est inférieure à valeur théorique tirée des normes, soit 0,09 MPa pour le cisaillement.

Ainsi, lors de l'évènement, les contraintes induites dans la maçonnerie à l'appui du linteau sont plus grandes que la résistance de la maçonnerie. La méthode de travail utilisée pour le démantèlement de la fondation entraîne une surcharge dans la maçonnerie au point d'appui du linteau ce qui occasionne une rupture et cause l'effondrement du mur sur les travailleurs.

**Cette cause est retenue.**

#### **4.3.2 La méthode de travail utilisée pour le démantèlement de la fondation est inadéquate, elle n'assure pas la stabilité du mur.**

Comme mentionné précédemment, l'entrepreneur en maçonnerie applique une méthode de démontage en alternance (appelée en quinconce) pour procéder à la restauration des fondations. Cette méthode a déjà été utilisée par l'entrepreneur sur d'autres chantiers de restauration de maçonnerie lors de travaux en sous-œuvre.

Cette méthode permet de procéder au démantèlement d'une portion d'ouvrage de maçonnerie en conservant une section de l'ouvrage au-dessus de la zone de travail, et ce, sans mettre en place d'étalement dans les ouvertures créées. En effet, elle permet de répartir les charges dans les sections de maçonnerie qui sont laissées en place et qui sont adjacentes aux sections en cours de démontage.

Une méthode de type « quinconce » se réalise en suivant une séquence régulière de démontage et de remontage de section de maçonnerie en alternance. Généralement, les ouvertures de démantèlement doivent avoir une largeur équivalente à la largeur de la maçonnerie laissée en place, et ce, afin de ne pas entraîner de charges excessives dans la maçonnerie qui demeure en place.

De plus, une méthode de travail en quinconce ou alternée doit être adaptée à chaque ouvrage, au type de maçonnerie, à son état et à son appareillage. La présence d'ouvertures existantes est également un élément qui doit être considéré pour appliquer une méthode en quinconce.

Ainsi, la présence des ouvertures aurait dû être considérée avant d'appliquer la méthode en quinconce pour la restauration des fondations. Les ouvertures déjà présentes étaient une indication que la méthode en quinconce utilisée sur d'autres chantiers ne pouvait pas être utilisée sans modification. Une évaluation était donc nécessaire afin de déterminer si la présence de ces ouvertures nuisait à l'application de la méthode en quinconce. Ceci aurait permis de modifier la méthode de travail, soit en adaptant les ouvertures à créer à la présence des ouvertures existantes, par exemple en diminuant leur dimension ou bien en prévoyant la mise en place d'étalement, tel que suggérée dans les plans de structures.

De plus, une évaluation des conditions présentes : type de maçonnerie, son état, etc. est d'autant plus nécessaire puisque le bâtiment a près de 300 ans, qu'il a été inoccupé et peu entretenu au cours des 60 dernières années et que des travaux de consolidation sont en cours afin de limiter son état de dégradation. Les travaux à réaliser sur le bâtiment indiquent que la maçonnerie du mur située au-dessus des fondations était en mauvais état. Cet élément est une contre-indication à l'utilisation d'une méthode sans étalement ou support.

Dans ce cas-ci, la méthode de travail utilisée pour démanteler la fondation ne possède pas les caractéristiques d'une méthode en alternance puisque les ouvertures à l'ouest et à l'est du saut-de-loup ne suivent pas une séquence, ne forment pas de bandes verticales et sont de grandes dimensions. De plus, des ouvertures sont déjà présentes dans le mur, soit le saut-de-loup au

niveau 1 et la porte de garage au niveau 2. La méthode utilisée au moment de l'accident ne permettait pas un transfert de charge adéquat dans les portions de maçonnerie restantes et cela a provoqué des contraintes dans la maçonnerie et un dépassement de sa résistance aux points d'appuis du linteau. En effet, la maçonnerie n'était pas en mesure de reprendre la charge (poids du mur). Cette surcharge a donc entraîné une rupture de la maçonnerie et l'effondrement du mur.

Conséquemment, le choix de la méthode retenue pour la restauration des fondations était inadéquat compte tenu de l'ensemble des conditions présentes : les ouvertures existantes, l'état de la maçonnerie, etc. La méthode utilisée pour la restauration des fondations n'a pas permis d'assurer la stabilité du mur lors de la réalisation des travaux.

**Cette cause est retenue.**

#### **4.3.3 Le manque de planification des travaux de démantèlement des fondations ainsi qu'une supervision insuffisante entraînent l'utilisation d'une méthode de travail dangereuse.**

Selon les trois versions d'échéancier du projet, les travaux de démantèlement de la fondation du mur sud entre l'axe 3 et 4 sont censés débuter au mois de mai 2018 (entre le 1<sup>er</sup> et le 15 mai). Ainsi, puisque l'échéancier est sous la responsabilité du maître d'œuvre, celui-ci ne peut ignorer que les travaux de démolition de la fondation sont commencés. Il en est de même pour l'entrepreneur en maçonnerie qui participe à l'élaboration de l'échéancier pour les éléments touchant la maçonnerie.

De plus, le maître d'œuvre est responsable de donner accès aux fondations pour réaliser les travaux. Vers le 10 mai 2018, il procède à l'excavation du terrain de la façade entre l'axe 3 et 4. Par conséquent, il ne peut ignorer que la démolition de cette section de la fondation est imminente.

Bien que les travaux de démolition de la fondation soient planifiés, l'entrepreneur en maçonnerie n'élabore pas une méthode de travail validée par un ingénieur tel qu'exigée aux devis. De plus, le maître d'œuvre ne communique pas avec l'entrepreneur en maçonnerie afin d'obtenir cette méthode de travail et ainsi l'envoyer à WSP et STGM. Il n'exige pas les plans des étalements et leur mise en place, tel que le prévoit les devis structures et architectures lorsqu'une portion d'ouvrage doit demeurer en place au-dessus des travaux de démantèlement.

En effet, plusieurs clauses des devis en structure et en architecture indiquent qu'une méthode de travail doit être présentée 10 jours avant le début des travaux aux responsables de la surveillance des travaux, WSP et STGM. Le maître d'œuvre doit fournir des plans qui détaillent les étapes de réalisation. Il est aussi demandé que les plans soient préparés et signés par un ingénieur qui possède de l'expérience dans la réalisation d'ouvrage en maçonnerie de pierre massive. Le devis structure indique que lorsque des portions d'ouvrage de maçonnerie doivent être maintenues en place au-dessus d'une zone à démanteler, les largeurs d'ouvertures doivent être déterminées en fonction de l'état de la maçonnerie. Ces demandes aux plans et devis sont des indications que les travaux de démantèlement partiel, qui nécessitent des interventions en sous-œuvre, sont des

travaux « critiques » et que ceux-ci doivent être planifiés et encadrés de manière à éviter une rupture de l'ouvrage et un accident.

De plus, dans le plan de structure, des étaitements et une méthodologie de travail sont proposés pour les travaux de démantèlement de la fondation. La méthode proposée prévoit la mise en place d'étalement et l'application d'une méthode de démontage en « bande colonne alternée ». Ces propositions ne sont pas obligatoires, mais donnent des indications concernant le type de méthode à appliquer et la nécessité d'obtenir une évaluation par un ingénieur. Le maître d'œuvre et l'entrepreneur en maçonnerie, ayant tous les deux accès aux plans, auraient dû connaître cette proposition et en tenir compte dans la planification des travaux. Le représentant du maître d'œuvre nous a indiqué qu'un plan typique pour le démantèlement de la fondation était présenté aux plans, mais il n'a pas été en mesure de le retrouver. Aucun représentant de l'entreprise en maçonnerie ne nous a parlé de ces éléments.

Depuis le début du chantier, le maître d'œuvre a obtenu une seule attestation d'ingénieur provenant de l'entrepreneur en maçonnerie. Cette attestation concerne les ouvertures effectuées dans le mur de la façade sud et prévues au plan d'architecture. Les supports présentés dans cette attestation concernent uniquement la maçonnerie de parement extérieur. L'attestation n'indique pas les moyens permettant de supporter la maçonnerie du noyau du mur.

Le *Code de sécurité pour les travaux de construction* prévoit certaines dispositions lors de travaux de démolition. Le démantèlement, même partiel, de mur en maçonnerie massive, est considéré comme étant des travaux de démolition. De ce fait, le code spécifie qu'une partie de bâtiment en démolition doit être solidement étayée ou soutenue afin d'éviter tout danger d'écroulement. Il indique également que la démolition doit s'effectuer depuis le toit jusqu'au sol. Lorsque la démolition ne s'effectue pas depuis le haut, un autre procédé doit être établi et approuvé par un ingénieur. Conséquemment, des méthodes de travail sécuritaires doivent être élaborées et les travaux de démolition doivent faire l'objet d'une planification. Enfin, plus spécifiquement concernant la démolition de maçonnerie, le code prévoit que celle-ci ne doit pas se faire par masses afin de ne pas diminuer la solidité de la charpente et des supports.

Avant le début des travaux de démolition, aucun procédé de démolition ou méthode de travail n'a été établi. Les travaux de démantèlement de la fondation ont été planifiés sans effectuer une analyse approfondie de l'ensemble des conditions en place, telles que l'état de la maçonnerie, les ouvertures déjà présentes, etc. En effet, il a été décidé par le surintendant et le contremaître des maçons d'appliquer une méthode de travail en alternance, appelée par ceux-ci méthode en quinconce. Aucune analyse des conditions n'est effectuée afin de s'assurer qu'une méthode en quinconce peut être appliquée. La dimension des ouvertures à créer est déterminée par le contremaître en se basant sur son expérience acquise sur d'autres chantiers. Lors de la réalisation d'ouvertures dans un mur porteur de maçonnerie, il est nécessaire d'analyser le comportement des charges dans le mur. Cette évaluation doit être effectuée par une personne spécialisée. Malgré cela, [ H ] appelé au besoin par l'entrepreneur maçon n'a pas eu le mandat d'élaborer une méthode de travail pour la restauration des fondations en sous-œuvre.



De plus, la méthode utilisée pour démanteler les fondations est expliquée de façon verbale aux travailleurs par le contremaître des maçons. Il leur indique sur place les limites de démantèlement à respecter. Aucun plan n'est annoté et aucun marquage n'est fait sur les fondations afin de bien établir les limites de démantèlement, d'indiquer les dimensions des ouvertures à pratiquer et la séquence à suivre tel que le prévoit habituellement ce type de méthode. De plus, les travailleurs nous indiquent qu'ils n'ont pas eu la directive de mettre en place de l'étalement dans les ouvertures. Aucune information au sujet des risques, mesures de prévention et des méthodes de travail n'a été retrouvée dans le programme de prévention de Briquetal.

Malgré le fait qu'une méthode en quinconce ne nécessite pas la mise en place d'étalement, la décision de mettre en place ou non des étalements ou dispositifs de blocage est confiée aux travailleurs qui exécutent les travaux sur le chantier. Cependant, dans le programme de formation professionnelle en briquetage-montage, il n'y a aucun module d'apprentissage concernant la détermination des besoins en étalement. De plus, dans le cadre du cours « Restauration de la maçonnerie », différentes méthodes d'étalement sont présentées, mais selon les enseignants questionnés, cela se fait toujours en fonction d'un plan ou d'une méthode préparée par un professionnel. Selon eux, le choix des méthodes et la décision de mettre en place des étalements ne doit pas relever des maçons.

En effet, la décision de mettre en place de l'étalement ou non ainsi que l'élaboration des méthodes de travail lors de travaux de démantèlement en sous-œuvre nécessitent une bonne connaissance du comportement de la maçonnerie, du bâtiment, de son état et des charges présentes. Il ne revient donc pas aux travailleurs de déterminer les besoins en étalement lorsque des travaux de démantèlement en sous-œuvre sont effectués. En effet, selon l'article 51 de la LSST, alinéa 3 et 5, l'employeur doit déterminer les méthodes de travail sécuritaires et identifier les risques et les moyens de les contrôler ou les éliminer.

L'ensemble de ces éléments nous démontre le manque de planification concernant le choix de la méthode de travail utilisée pour la restauration des fondations. L'absence d'un plan ou d'une méthode de travail établi à l'avance, écrit et validé par un ingénieur indique des lacunes dans la planification des travaux de démantèlement de la fondation. Ni l'entrepreneur en maçonnerie, ni le maître d'œuvre ne se sont assurés de la planification de ces travaux. En effet, l'entrepreneur en maçonnerie s'est basé sur une méthode de travail utilisée ailleurs sans refaire une analyse en fonction du chantier actuel et de ces particularités.

Quant au maître d'œuvre, celui-ci n'a pas effectué de suivi auprès de l'entrepreneur en maçonnerie afin d'obtenir sa méthodologie pour les travaux de restauration des fondations tel que prévue dans les devis. Il ne s'est pas questionné sur l'absence de plan et attestation d'étalements ainsi que sur le manque d'étalements dans les ouvertures déjà effectuées dans la fondation et dans le mur sud. De plus, il ne s'est pas assuré du respect de certaines règles indiquées à la section 3.18 du *Code de sécurité pour les travaux de construction*. Ces lacunes dans sa supervision ont permis à l'entrepreneur en maçonnerie d'utiliser une méthode de travail qui n'était pas appropriée

aux conditions du chantier. Par conséquent, ces éléments confirment un manque de supervision du maître d'œuvre.

Enfin, les mécanismes de surveillance et d'approbation des méthodes de travail et des plans prévus aux devis et confiés aux professionnels, WSP et STGM, n'ont pas permis de s'assurer que la méthode utilisée pour le démantèlement de la fondation assurait la stabilité du mur.

**Cette cause est retenue.**



## SECTION 5

### 5 CONCLUSION

#### 5.1 Causes de l'accident

- Le démantèlement de la fondation génère une surcharge de la maçonnerie et cause l'effondrement du mur sur les travailleurs.
- La méthode de travail utilisée pour le démantèlement de la fondation est inadéquate, elle n'assure pas la stabilité du mur.
- Le manque de planification des travaux de démantèlement des fondations ainsi qu'une supervision insuffisante entraînent l'utilisation d'une méthode de travail dangereuse.

#### 5.2 Autres documents émis lors de l'enquête

Dans le rapport d'intervention RAP1223758 émis le 14 mai 2018, la CNESST a ordonné la suspension des travaux sur le chantier ainsi qu'une interdiction d'accéder au périmètre de sécurité. La CNESST a exigé au maître d'œuvre une attestation de solidité et de sécurité du bâtiment. Il a également été demandé de mettre en place des méthodes de travail sécuritaires concernant les travaux de démantèlement de la maçonnerie.

Entre le 14 mai 2018 et le 19 décembre 2018, la reprise des travaux dans les blocs 4-3 et 2 est autorisée au fur et à mesure de l'obtention des attestations [...] confirmant la sécurité de chacun des blocs. Finalement, le 19 décembre 2018, la décision de suspension des travaux dans le bloc 1 est levée dans le rapport d'intervention RAP1248525. Des correctifs et des interventions visant à assurer la stabilité du bâtiment ont été effectués par le maître d'œuvre et ont été supervisés par [...] de WSP et de Douglas Consultants. Des attestations confirmant la stabilité et la sécurité du bâtiment ont été transmises par [...] de WSP et de Douglas Consultants.

Dans le rapport RAP1252850, la CNESST a également exigé à l'entreprise Briquetal Ltée d'identifier les risques ainsi que les mesures de prévention à mettre en place lors des travaux de démantèlement de la maçonnerie, notamment lorsque des portions d'ouvrage sont conservées au-dessus de la zone de démantèlement. Ces procédures ont été ajoutées au programme de prévention de l'entreprise.

#### 5.3 Recommandations

Pour éviter qu'un tel accident ne se reproduise, la CNESST transmettra les résultats de son enquête aux partenaires suivants : l'Association de la construction du Québec, l'Association patronale des entreprises en construction du Québec, l'Association des entrepreneurs en construction du Québec; l'Association des professionnels de la construction et de l'habitation du Québec, l'Association des entrepreneurs en maçonnerie du Québec et à l'Institut de la maçonnerie du Québec.

Dans le cadre de son partenariat avec la CNESST, le ministère de l'Éducation et de l'Enseignement diffusera le rapport d'enquête dans ses établissements de formation qui offrent le programme d'études de maçonnerie et ce afin de sensibiliser les enseignants et les travailleurs à ces risques.

**ANNEXE A****LES ACCIDENTÉS**

**Nom, prénom** : [ N ]  
Sexe : [...]  
Âge : [...]  
Fonction habituelle : [...]  
Fonction lors de l'accident : Manœuvre  
Expérience dans cette fonction : [...]  
Ancienneté chez l'employeur : [...]  
Syndicat : [...]

**Nom, prénom** : [ M ]  
Sexe : [...]  
Âge : [...]  
Fonction habituelle : [...]  
Fonction lors de l'accident : Apprenti Briqueteur-Maçon  
Expérience dans cette fonction : [...]  
Ancienneté chez l'employeur : [...]  
Syndicat : [...]

**ANNEXE B**

## Liste des personnes et témoins rencontrés

**Tro-chaînes inc.**

- Monsieur [ P ], Tro-Chaînes inc.;
- M. [ J ], Tro-Chaînes inc.;
- M. [ S ], Tro-Chaînes inc.;
- M. [ O ], Tro-Chaînes inc.;

**Briquetal Ltée.**

- Monsieur [ T ], Briquetal Ltée.;
- Monsieur [ I ], Briquetal Ltée.;
- Monsieur [ N ], manœuvre, Briquetal Ltée.;
- Monsieur [ U ], Briquetal Ltée.;
- Monsieur [ K ], Briquetal Ltée.;
- Monsieur [ M ], maçon, Briquetal Ltée.;
- Monsieur [ V ], Briquetal Ltée.;

**Commission de la Capitale-Nationale du Québec**

- Monsieur Éric Maurand, architecte sénior, Commission de la Capitale-Nationale du Québec;
- Monsieur Larry Tremblay, ing., chargé de projet, Commission de la Capitale-Nationale du Québec;
- Madame Carine Nadeau, conseillère en aménagement et architecture, Commission de la Capitale-Nationale du Québec;
- Monsieur Juan Vargas, architecte, directeur de l'aménagement et de l'architecture, Commission de la Capitale-Nationale du Québec;

**STGM**

- Madame [ W ], STGM inc.;
- Monsieur [ Q ], STGM inc.;
- Madame [ X ], STGM inc.;
- M. [ Y ], STGM inc.;

**WSP Canada inc.**

- Madame [ Z ] WSP Canada inc.;
- Monsieur [ A1 ], WSP Canada inc.;
- Monsieur [ R ] WSP Canada inc.;



**Autres**

- Monsieur Simon Bernard, agent de police, Service de police de la Ville de Québec
- Monsieur [ B1 ], Tetra Tech;
- Monsieur [ C1 ], Tetra Tech;
- Madame [ D1 ], Artéfactuel,
- Monsieur [ E1 ], Douglas consultant inc.;
- Monsieur [ F1 ], DronExperts;
- Madame [ L ], 1054 inc. ([...]);
- M. [ G1 ], Maçonnerie Dynamique Ltée;
- M. [ H1 ], Maçonnerie Dynamique Ltée;
- Monsieur Mathieu Tanguay, architecte, conseiller en patrimoine, Ministère de la culture et des communications;
- Monsieur Gérard Lafrance, directeur adjoint, École des métiers de la construction de Montréal;
- Monsieur Donato Rosario, enseignant Briquetage-maçonnerie, École des métiers de la construction de Montréal;
- Monsieur Rémi Veilleux, directeur adjoint, École des métiers et occupations de l'industrie de la construction de Québec.

**ANNEXE C**

Rapport d'expertise externe



## **CNESST**

**Expertise technique visant la compréhension de l'événement  
du 14 mai 2018 au chantier des Nouvelles-Casernes – Phase 1**

### **Rapport d'expertise – Version finale**

N/D :

2019/02/28

**Rév. : 01**

**PRÉSENTÉ À :**

---

**CNESST**  
*Direction régionale de la Capitale-Nationale*  
425, rue du Pont  
5<sup>e</sup> étage  
Québec (Québec) G1K 9K5

**PRÉSENTÉ PAR :**

---

**TETRA TECH QI INC.**      **Tél. : 418 871-8151**  
4655, boulevard Wilfrid-      **Télec. : 418 871-9625**  
Hamel      **[tetratech.com](http://tetratech.com)**  
Québec (Québec) G1P 2J7

**PRÉPARÉ PAR :**

---

2019C2-28

---

2019-02-28

Rapport d'expertise - Version finale

## TABLE DES MATIÈRES

MISE EN CONTEXTE ET MANDAT .....	1
VOLET 1 – AVIS SUR L'ÉTAT DE LA FAÇADE SUD ET SA CONCEPTION.....	1
EXPERTISES TECHNIQUES D'AVANT-PROJET .....	1
ÉTAT DE LA FAÇADE SUD.....	1
PLANS ET DEVIS – ARCHITECTURE ET STRUCTURE .....	2
VOLET 2 – ESTIMATION DES CHARGES ET DES FORCES NÉCESSAIRES À L'EFFONDREMENT DU MUR 3	
VOLET 3 – DESCRIPTION DES IMPACTS DE CERTAINS OUTILS .....	10
VOLET 4 – AVIS SUR LES TECHNIQUES DE TRAVAIL .....	11
ÉTAT DE LA MAÇONNERIE – OBSERVATIONS EN COURS DE CHANTIER .....	11
INTERVENTIONS – LES PLANS VERSUS LE CHANTIER.....	12
ÉTAIEMENT ET MÉTHODOLOGIE.....	14
PISTES DE RÉFLEXION ET BONIFICATION DES INTERVENTIONS.....	15
CONCLUSION.....	17

## ANNEXES

ANNEXE 1 – EXTRAITS DE PLANS ET DEVIS PERTINENTS

2019-02-28

Rapport d'expertise - Version finale

## MISE EN CONTEXTE ET MANDAT

Tetra Tech a été mandaté par la CNESST afin de contribuer à l'enquête suite à l'évènement du 14 mai 2018 sur le site du chantier de la phase 1 des Nouvelles-Casernes, situé au 1, rue de l'Arsenal. En début de mandat, nous avons réalisé une rencontre avec la CNESST afin de bien comprendre les besoins de la présente expertise et nous avons réalisé une première visite éclair sur le site, le 5 juillet, alors que le chantier était encore fermé. Une deuxième visite au site a été réalisée le 15 août dernier, de manière à faire un relevé visuel de certains éléments de la structure du bâtiment. Le chantier était à ce moment partiellement actif. Une troisième visite sur le site a eu lieu le 14 novembre dernier, mais aucun accès direct à la zone n'a été effectué.

Le rapport d'expertise sera présenté en quatre volets, soit :

- **Volet 1** – Avis sur l'état de la façade sud et sa conception.
- **Volet 2** – Estimation des charges et des forces nécessaires à l'effondrement du mur.
- **Volet 3** – Description des impacts de certains outils.
- **Volet 4** – Avis sur les techniques de travail.

La présente expertise technique ne traite que de la première phase des travaux aux Nouvelles-Casernes, c'est-à-dire celle regroupant les blocs 1, 2 et 3. De manière plus spécifique, le mur sud du bloc 1 et ses conditions avec les ouvrages environnants seront traités dans les détails lors de cette expertise.

## VOLET 1 – AVIS SUR L'ÉTAT DE LA FAÇADE SUD ET SA CONCEPTION

### EXPERTISES TECHNIQUES D'AVANT-PROJET

Dans le cadre du projet de Restauration des Nouvelles-Casernes - Phase 1, l'équipe de professionnels mandatée au projet a réalisé, dans une première phase de travail, une campagne d'expertise visuelle et destructive du bâtiment au début de 2016. Cette phase d'expertise a traité de l'état de la maçonnerie massive, du parement extérieur et de l'enduit cimentaire. Lors de ces expertises, ont été réalisées, quelques ouvertures profondes dans le cœur du noyau et des ouvertures superficielles sur les murs extérieurs. Antérieurement à ce travail, la firme Genivar a réalisé un rapport complet d'expertise en 2010, dont les résultats auraient, en partie, orientés le projet dès son commencement en 2016. Selon l'information mise à notre disposition, les ouvertures réalisées dans les sections de murs massifs en 2010, et de manière moins élaborée en 2016, a permis aux professionnels de juger de la qualité de la maçonnerie dans différents secteurs. Les conditions rencontrées lors de ces ouvertures exploratoires sont présentées dans la section suivante.

### ÉTAT DE LA FAÇADE SUD

La présente a pour objectif de décrire l'état des éléments de maçonnerie de la façade sud dans la zone du bloc 1, en fonction de ce qui était connu au moment de préparer les plans et devis en 2016.



2019-02-28

Rapport d'expertise - Version finale

Pour les besoins de la présente section, comme il sera démontré dans la section suivante, les professionnels ont défini leurs interventions en fonction des constats réalisés lors des expertises. Règle générale dans le secteur visé, le constat de l'équipe de consultants était que l'état de dégradation de la **maçonnerie massive (noyau)** était avancé, principalement causé par une perte d'adhésion du mortier sur les pierres de moellon, ainsi qu'une fissuration des pierres de noyau elles-mêmes. L'état de cette maçonnerie a été jugé assez hétérogène sur la longueur de ce mur (de bon à très déconsolidé), mais compte tenu de la tendance forte à la déconsolidation, les professionnels ont décidé d'appliquer l'intervention visant sa déconstruction sur pratiquement toute la superficie de la zone.

Au niveau du **parement extérieur** de la même zone, la situation est différente. Basées sur le fait que le parement devait être conservé dans la mesure du possible, les interventions devaient être ciblées. Les zones où les pierres de parement devaient être démontées étaient définies en fonction de l'état de dégradation des pierres elles-mêmes (fissuration, décollement, délamination, etc.) ou du liant interpierres. Avec la prémisse que le noyau du mur allait être remplacé, il devenait possible pour de réaliser des interventions plus ciblées de remplacement de pierres de parement. Nous verrons, plus tard, que la restauration du parement a été réalisée dans un premier temps et que le remplacement du massif allait être réalisé dans un deuxième temps, ce qui a entraîné certaines conséquences.

## PLANS ET DEVIS – ARCHITECTURE ET STRUCTURE

De prime abord, nous comprenons que le volet de la maçonnerie a été traité sous deux aspects par et . Selon les principes illustrés aux plans, traitaient de la maçonnerie apparente, c'est-à-dire tout ce qui est visible du côté extérieur (parement, arc de décharge, chambranle, etc.) alors que traitait de toute la maçonnerie massive (noyau), du parement intérieur, armature, tirant et tout élément associé à la structure du bâtiment et des fondations.

Cette division de travail entre et est coutume. Elle définit la responsabilité de chacun pour tous les volets importants du projet, en partant des expertises initiales, passant par la production des plans et devis et se concluant par le suivi de chantier. Les plans mis à notre disposition démontrent bien cette approche.

### Documents d'ingénierie – Plans et devis

Dans le secteur du bloc 1, les travaux projetés en structure étaient globaux et relativement répétitifs. Ces travaux traitaient du massif de maçonnerie, incluant la pierre de parement intérieur. Pour une même zone de mur, les travaux en architecture traitaient du parement extérieur et étaient plus ponctuels, plus adaptés aux états variables de ce parement.

Dans le secteur qui attire notre attention, le mur sud au bloc 1, avait prévu démonter globalement la maçonnerie composant le noyau et le parement intérieur, à partir du niveau des fondations jusqu'au toit. Les interventions de remontage prévoyaient la mise en place d'ancrages à pierres de parement intérieur et extérieur selon des spécifications bien définies. Il était aussi prévu de mettre en place un rang d'armature de fibre de verre dans les nouveaux murs transversaux (murs de refend). Des fiches de liaison sont prévues aussi aux intersections entre le mur sud et les murs transversaux, de manière à consolider les jonctions et assurer un certain chaînage. Finalement, des ancrages au roc avec fiches de liaisonnement étaient prévus dans toutes les sections de mur à reconstruire.

Les plans démontrent le produit final, donc illustrent ce que l'entrepreneur et ses sous-traitants doivent atteindre comme résultat. Les professionnels fournissent à l'entrepreneur, toute l'information requise aux plans, de manière à ce que ce dernier soit en mesure de construire. Les méthodes pour y arriver, le cheminement et l'organisation de chantier sont de la responsabilité de l'entrepreneur, de son équipe de sous-traitants et , souvent requis pour des interventions bien ciblées. C'est l'esprit qu'on trouve dans les plans et devis.

2019-02-28

Rapport d'expertise - Version finale

### Documents d'architecture – Plans et devis

Pour cette même zone du bâtiment, les plans d'architecture démontrent les zones de travail sur le parement extérieur. Les principes de travail et les méthodes de construction sont non exhaustifs et ramènent l'entrepreneur à utiliser une méthodologie qui lui appartient, en fonction des travaux à réaliser et en fonction de ses habitudes d'intervenir sur ce type de mur de maçonnerie.

Plus spécifiquement, les interventions en architecture sur la façade sud prévoient deux types d'interventions sur la pierre de parement. Le premier type d'intervention (note 131 « type » à la feuille A-301) était superficiel et consistait à déposer l'enduit existant, à évider les joints, remplacer quelques pierres ponctuellement, rejointoyer partiellement sur la profondeur dégagée et réappliquer un enduit cimentaire sur la pierre. La superficie touchée par ce type d'intervention superficielle est montrée aux plans et elle constitue la majorité de la surface, soit une moyenne de 80 %. Le deuxième type d'intervention prévu sur le parement extérieur (note 111 « type » à la feuille A-301) consistait à réaliser une intervention en profondeur sur le parement par le biais d'un remplacement intentionnel d'une épaisseur de 450 mm du parement sur une zone définie. Cette nouvelle zone de parement devait être chaînée avec le nouveau noyau. La pose d'un enduit cimentaire était ensuite prévue. La feuille A-301 présente bien les interventions sur le parement extérieur. Ce qu'il faut comprendre de la nature des travaux sur ce parement, c'est qu'il était prévu (et souhaité) d'en conserver une grande partie sur la façade sud dans un objectif de conservation.

### Esprit général des documents

À la lecture des plans conjoints d'architecture et d'ingénierie, il est démontré que les intentions d'intervention sur les éléments de maçonnerie sous la responsabilité de chaque professionnel sont différentes, mais complémentaires. Résumons la stratégie des professionnels sur cette section de mur sud faisant 850 à 940 mm d'épaisseur en partant du toit jusqu'au niveau 2. D'abord, les plans de structure traitaient du noyau et du parement intérieur avec pour objectif **une reconstruction quasi totale de l'épaisseur de maçonnerie**. En architecture, les **interventions prévues sur le parement extérieur étaient ciblées en priorisant la conservation de la pierre** via une restauration des joints et des enduits cimentaires, et lorsque requis, un remplacement ponctuel. **Cette stratégie de séparer les interventions pour une même coupe de mur rend les choses assez complexes** comme il sera discuté plus loin.

Les plans, et spécialement le devis, fournissent l'information à l'entrepreneur en ce qui a trait aux principes de construction, méthodologies et étaitements. L'esprit de « performance » des documents d'ingénierie est mis en évidence dans les documents. À plusieurs reprises dans les documents, nous retrouvons l'information comme quoi l'entrepreneur est responsable de fournir sa méthodologie et de soumettre des plans d'étalement et de travail bien planifiés, en fonction du résultat attendu. Il est clair que la CCNQ, s'attendent de recevoir en cours de travaux des documents techniques complémentaires, préparés par , servant à exposer les techniques de travail.

*Annexe 1 : voir extraits de plans de la zone ciblée (bloc 1) en architecture et en ingénierie.*

## **VOLET 2 – ESTIMATION DES CHARGES ET DES FORCES NÉCESSAIRES À L'EFFONDREMENT DU MUR**

Le présent point vise à démontrer les causes techniques qui ont mené à la rupture d'une section de mur de maçonnerie entre les axes 3 et 4 du bloc 1. Avec l'information qui a été mise à notre disposition, même s'il est impossible d'être en totale maîtrise des conditions de maçonnerie au moment de l'accident, il est possible de réaliser une démonstration de ce qui a pu mener au point de rupture de la bande de maçonnerie.

2019-02-28

Rapport d'expertise - Version finale

Parmi les intrants connus :

- Les données géométriques sur les épaisseurs des murs selon les plans de structure. En effet, le mur de l'axe A a une épaisseur de  $\pm 940$  mm au niveau 2,  $\pm 850$  mm au niveau 3 et  $\pm 850$  mm au niveau 4.
- Les données techniques des éléments de maçonnerie, tels le type de pierres, leur masse volumique, le type de mortier de rejointoiment et sa capacité en compression. Selon les informations obtenues avec les plans et devis et avec les recherches effectuées dans le cadre d'autres projets de maçonnerie historiques, le parement extérieur est en grès vert ou brun ayant un poids volumique d'environ  $26 \text{ kN/m}^3$ , le noyau et le parement intérieur sont en calcaire de Beauport/Château-Richer ayant un poids volumique d'environ  $26 \text{ kN/m}^3$ . Lors de l'évènement, le parement extérieur dans le secteur où a eu lieu l'effondrement avait été rejointoyé, mais le noyau de maçonnerie en calcaire n'avait pas encore été consolidé. Selon le devis en architecture, le mortier de rejointoiment (profondeur demandée de  $75 \text{ mm}$  au devis) pour le parement extérieur devait être du Masoncare 300 de King ou Restomix de Daubois. Les fiches techniques des produits indiquent des résistances à la compression minimales respectives de  $2,4 \text{ MPa}$  et  $2,5 \text{ MPa}$  à 28 jours.
- Les conditions d'appui sous la section de mur, au droit du saut-de-loup. Les plans en structure montrent clairement que les murs étaient appuyés directement sur le roc.
- La détermination des charges mortes et vives appliquées sur la section de mur. Lors de l'évènement de mai 2018, l'ensemble des planchers, des voutes et du toit étaient étayés. Ceci signifie que la charge reprise par le mur de maçonnerie de l'axe A était uniquement composée de son propre poids. Les charges mortes et vives des planchers et du toit étant complètement reprises par les étalements.

Parmi les intrants pour lesquels il a été requis de prendre des hypothèses par manque d'information :

- Il est maintenant connu que la section du mur sud entre les axes 3 et 4 n'était liaisonnée que minimalement avec les murs transversaux, mais ne l'était pas avec les voutes. Il est, par contre, difficile de quantifier ce chaînage.
- L'avancement des travaux, c'est-à-dire où en était rendu l'entrepreneur spécialisé dans les travaux de restauration du secteur, de façon précise (remontage intérieur, remplacement de pierres de parement, rejointoiment). Selon les informations obtenues, nous savons que le rejointoiment du parement extérieur autour du saut-de-loup, entre les axes 3 et 4, était complété et que la réparation pleine épaisseur du mur était en cours de chaque côté du saut-de-loup (voir photo n° 1).

Les données techniques ayant servi à réaliser les calculs vont comme suit :

- Pierre calcaire : masse volumique  $2\,700 \text{ kg/m}^3$ , résistance en compression  $150 \text{ MPa}$ .
- Pierre de grès : masse volumique  $2\,670 \text{ kg/m}^3$ , résistance en compression  $167 \text{ MPa}$  en condition sèche et  $112 \text{ MPa}$  en condition humide.
- Le poids volumique de la pierre calcaire et du grès étant similaire, nous avons considéré une masse volumique de  $2670 \text{ kg/m}^3$ , soit un poids volumique d'environ  $26 \text{ kN/m}^3$ .

Selon ce qui est connu, le secteur où l'effondrement a eu lieu n'avait pas été reconstruit en pleine épaisseur. Les travaux en cours lors de l'accident traitaient justement de la reconstruction pleine épaisseur du noyau de maçonnerie au niveau des fondations, mais le massif de pierre qui était au-dessus du saut-de-loup était d'origine.

2019-02-28

Rapport d'expertise - Version finale

### Les valeurs en compression et en cisaillement

La maçonnerie d'origine étant constituée de matériaux très hétérogènes, et aux conditions tout aussi variables, constituée d'un assemblage de pierres de forme irrégulière et de mortier, il est très difficile d'évaluer avec exactitude la résistance en compression et en cisaillement du mur de maçonnerie existant. Pour ce faire, deux normes différentes ont été considérées, soit la norme ASCE41-06 (SEISMIC REHABILITATION OF EXISTING BUILDINGS) et la norme CSA S304-14 (CALCUL DES OUVRAGES EN MAÇONNERIE). La publication « *Review of historic stone masonry properties* » émise lors du « *Seventh Canadian Masonry Symposium* » nous a aidés à valider les résistances en compression et en cisaillement pour un ouvrage de maçonnerie pouvant s'apparenter à celui des Nouvelles-Casernes. La norme S304-14 recommande d'utiliser une **contrainte maximale admissible en compression** de 0,7 MPa pour une maçonnerie non armée pleine en moellons bruts (le noyau) et de 2,2 MPa pour du grès taillé (parement extérieur). Les valeurs précédentes sont basées sur un calcul de contrainte admissible. Tel que spécifié dans l'annexe F de la norme S304-14 :

*[...] La méthode de calcul empirique limite les contraintes de compression dans un élément de maçonnerie aux valeurs acceptées qui offrent des niveaux appropriés de sécurité si on les compare à la résistance nominale de la maçonnerie. [...]*

Ceci signifie que les valeurs de 0,7 MPa et 2,2 MPa sont déjà réduites pour tenir compte d'une certaine sécurité dans les résistances. Il n'a cependant pas été possible de connaître le pourcentage de réduction qu'applique la norme par rapport à des valeurs réelles attendues. Par conséquent, ces chiffres seront utilisés directement pour les vérifications à la rupture en compression. Il est à noter que la publication mentionnée précédemment « *Review of historic stone masonry properties* » évalue la résistance en compression moyenne à la rupture (donc sans majoration) d'un mur de maçonnerie à 1,3 MPa.

La norme ASCE41-06 recommande, quant à elle, une contrainte maximale de 2,07 MPa en compression et 0,09 MPa en cisaillement pour une maçonnerie de mauvaise qualité. Cette norme est cependant basée sur des recherches effectuées pour des parements de maçonnerie de briques. Cette référence étant la seule norme accessible fournissant une valeur de résistance en cisaillement selon différents états de dégradation et étant représentative de l'ordre de grandeur de résistance en cisaillement de la référence canadienne, soit de 0,09 MPa à 0,69 MPa, elle sera donc utilisée pour la vérification de rupture en cisaillement. Ces valeurs de résistances provenant de la norme ASCE41-06 sont des valeurs de type « lower-bound », donc les plus basses auxquelles il est possible de s'attendre pour la rupture d'une maçonnerie de mauvaise qualité. La norme recommande d'ailleurs de majorer ces chiffres par un facteur 1,3 pour obtenir une valeur « attendue ». Désirant vérifier la résistance à la rupture, nous n'appliquerons pas le facteur de majoration de 1,3.

Résumé des résistances qui seront considérées pour les fins de calculs :

- o Résistance en cisaillement en service (non majorée) : 0,09 MPa
- o Résistance en compression en service (non majorée) : 0,7 MPa

Pour les fins de calculs, il a été considéré que la maçonnerie était de mauvaise qualité dans toute la zone à l'étude, ce qui est, en bonne partie, appuyée par la stratégie de restauration montrée aux plans. La photo n° 1 a été prise quelques heures avant l'accident et représente très précisément la zone du mur de maçonnerie s'étant effondré. La ligne rouge sur la photo n° 1 représente le plan de rupture ayant été observé après l'effondrement.



2019-02-28

Rapport d'expertise - Version finale



Photo n° 1 : État des travaux quelques heures avant l'effondrement

#### Les approches de calculs

Trois calculs principaux ont été effectués, soit l'évaluation de la contrainte en compression sous l'appui du linteau, la résistance en cisaillement à la ligne de rupture potentielle à gauche du linteau (voir ligne en rouge sur la photo n° 1) et la résistance en cisaillement à droite du linteau (ligne bleue et triangle vert sur la photo n° 3). Selon les informations obtenues, aucun étaieement n'était en place sous le linteau présent au-dessus de l'ouverture.

#### Calcul 01, en compression

Chaque plancher du bâtiment et la toiture étant étayés jusqu'aux fondations, la seule charge présente sur le mur est son poids propre. Avec les épaisseurs des murs montrées aux plans de structure, nous avons été en mesure d'évaluer la contrainte sous les appuis du linteau de béton. La surface de mur prenant assise sur ce linteau est montrée à la photo n° 2. La charge de mur considérée n'a pas subi de majoration. La surface d'assise considérée pour le linteau est de 329 000 mm<sup>2</sup>. La contrainte en compression obtenue représente une valeur de 0,63 MPa. Cette valeur est inférieure aux résistances recommandées dans les deux principales normes utilisées en référence, mais de très peu inférieure à la valeur maximale recommandée par la norme CSA S304-14 pour la portion de mur en calcaire (0,7 MPa).



2019-02-28

Rapport d'expertise - Version finale



Photo n° 2 : Aire tributaire de la charge supportée par le linteau

#### Calcul 02, en cisaillement sous le linteau

Le deuxième calcul effectué est celui de la résistance en cisaillement de la maçonnerie sur le plan de rupture allant de l'appui du linteau au bas de la ligne rouge montrée sur la photo n° 1. Il a été possible d'évaluer que la contrainte de cisaillement au plan de rupture était de 0,082 MPa, soit légèrement moins que la résistance suggérée de 0,09 MPa dans la norme ASCE41-06. La longueur de cisaillement considérée dans les calculs est de l'ordre de 2 700 mm, alors que la charge appliquée sur cette ligne de rupture virtuelle est de 208 kN (non pondérée).

#### Calcul 03, en cisaillement au pied du massif

Le troisième calcul effectué est celui de la résistance en cisaillement de la maçonnerie sur le plan de rupture de la ligne bleue et du triangle vert sur la photo n° 3. Selon les informations obtenues, l'ouverture réalisée dans le mur à droite du saut-de-loup était pratiquement sur la pleine épaisseur (l'intérieur de la voûte était visible selon les déclarations des témoins). La charge provenant du linteau devait donc être acheminée vers un élément rigide selon un angle de transfert maximal de 45°. La charge provenant de l'appui du linteau ainsi décomposé offre une réaction horizontale et verticale à l'appui du massif. L'effort horizontal devait donc être repris par le plan de rupture horizontal (ligne bleue sur la photo n° 3), mais aussi par la jonction entre le mur de l'axe 4 et celui de l'axe A (surface triangulaire verte sur la photo). La contrainte de cisaillement calculée sur ces deux plans de rupture est de 0,08 MPa, ce qui est inférieur à la résistance en cisaillement suggérée de 0,09 MPa dans la norme ASCE41-06.

2019-02-28

Rapport d'expertise - Version finale

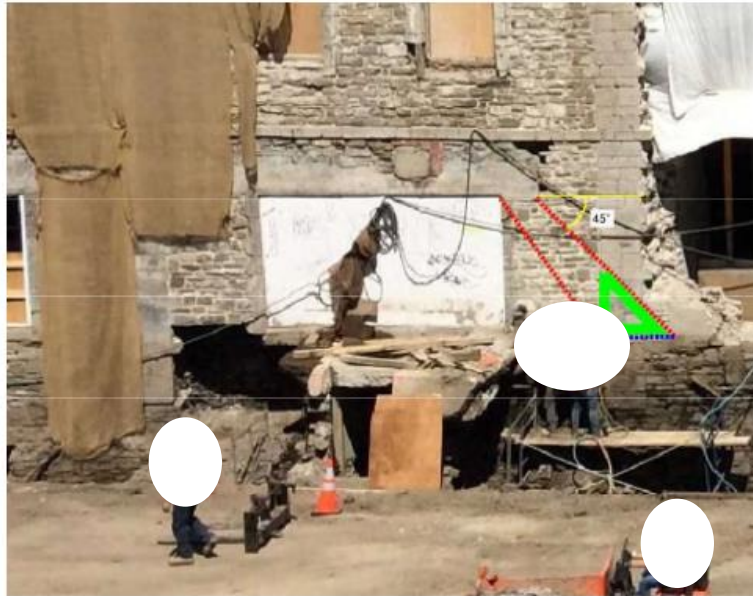


Photo n° 3 : Plan de cisaillement à droite du linteau



Photo n° 4 : État de la situation après l'effondrement de la section de mur

2019-02-28

Rapport d'expertise - Version finale



Photo n° 5 : État de la situation une fois la tranchée nettoyée

Ainsi, les calculs théoriques démontrent que la résistance de la maçonnerie a toujours été plus grande que l'effort engendré. La résistance en cisaillement à gauche de l'ouverture est cependant seulement 10 % supérieure à la charge appliquée. Rappelons que la valeur de résistance en cisaillement utilisée est de type « lower-bound », donc à la limite inférieure de ce que nous pouvons nous attendre et sans facteur de sécurité intégré.

**Les calculs effectués ne permettent donc pas de conclure hors de tout doute si la rupture provient d'un manque de résistance en compression ou d'un manque de résistance en cisaillement.**

Une rupture ayant cependant eu lieu, les efforts ont nécessairement été supérieurs à la résistance locale des éléments de maçonnerie. Les résistances données en référence dans les normes ne tiennent pas compte de facteurs extérieurs mécaniques auxquels aurait subi l'ouvrage pendant les travaux, notamment la vibration amenée par les travaux de démolition et de rejointoiement. En effet, bien que la méthode de démolition utilisée lors de l'événement fut effectuée avec des équipements de faible puissance, les vibrations engendrées peuvent tout de même induire de la microfissuration à la maçonnerie, accélérant de surcroît la décohérence du massif et atteignant de façon non négligeable la résistance de la masse.

Cette microfissuration a moins d'impact sur les contraintes de compression, la compression ayant tendance à fermer les petites fissures (compresser la matière). En revanche, la situation est différente pour le cisaillement. Un cisaillement étant principalement un plan de rupture, la moindre microfissuration dans la maçonnerie et les joints de mortier aura tendance à diminuer la valeur de résistance en cisaillement admissible du matériau.



2019-02-28

Rapport d'expertise - Version finale

Il est bon de rappeler qu'avant l'effondrement de la section de mur, des travaux de rejointoiment sur le parement extérieur avaient eu lieu, ainsi que des travaux de démolition du noyau de chaque côté du saut-de-loup. Il y avait aussi eu la démolition du mur de refend de l'axe 4, et lors de l'effondrement, deux ouvriers étaient à effectuer des travaux de démolition sur le saut-de-loup du niveau 1, entre les axes 3 et 4.

Il n'est malheureusement pas possible de quantifier la perte de résistance de la maçonnerie suite à la présence de cette microfissuration causée par les travaux de déconstruction. Par conséquent, il est impossible de conclure, hors de tout doute, que ces travaux de déconstruction expliquent, via les impacts des vibrations, à eux seuls l'effondrement du mur.

**En conclusion, il est justifié d'avancer que l'effondrement a été causé par une rupture en cisaillement ou en compression de la maçonnerie sous l'effet des contraintes induites à l'appui du linteau, contraintes nécessairement supérieures à la résistance résiduelle de la maçonnerie (résistance théorique + effet de décohéation dû aux vibrations). Il n'est malheureusement pas possible de confirmer si la rupture a eu lieu à l'appui gauche ou à l'appui droit du linteau du 2<sup>e</sup> étage.**

### VOLET 3 – DESCRIPTION DES IMPACTS DE CERTAINS OUTILS

Selon les informations de chantier mises à notre disposition, la déconstruction de la maçonnerie se faisait de manière manuelle, sans machinerie lourde. Les équipements utilisés étaient des marteaux piqueurs pneumatiques usuels comme il est souvent prévu pour ce type de travaux de déconstruction. L'utilisation de marteaux piqueurs pneumatiques est inévitable pour la plupart des zones de démolition et de démontage, sachant que les éléments de maçonnerie ont souvent encore une cohésion résiduelle importante.

Sachant que l'utilisation d'un outillage pneumatique était pratiquement incontournable pour ce type de déconstruction, la problématique de déconstruction n'est pas en lien avec l'outil à proprement dit, mais avec la méthode d'intervention et le concept visé. Le concept d'intervention en deux phases avait pour **objectif principal de conserver la plus grande zone de parement extérieur** possible. Or, étant donné l'épaisseur type du mur d'environ 850 mm, les vibrations induites par les outils lors de la déconstruction des premières zones de noyau et des murs transversaux ont eu des impacts néfastes et irréversibles **sur l'intégrité des zones de pierres de parement à conserver**. Il est, par contre, très difficile de quantifier ces impacts. D'ordre général pour des interventions de ce type, les effets induits se définissent normalement en un **décollement du mortier de pose liaisonnant les pierres entre elles**, et donc, en un détachement non souhaité de la maçonnerie. Ce résultat est irréversible, puisque si les pierres ne sont pas démontées et remontées, le liant de mortier qui les unit sur la profondeur de leurs faces latérales est, par conséquent, affecté à jamais.

Même si des tiges de liaisonnement et la mise en place d'ancrages entre le parement et le nouveau noyau étaient prévues, il n'en demeure pas moins que s'il y a détachement entre le mortier et les pierres de parement, l'intégrité du mur est en partie altérée. À notre connaissance, lors de l'incident, très peu d'ancrages de pierres de parement avaient été installés et une très faible zone de noyau avait été déconstruite et remontée.

Il est bon de mentionner que les murs de refend aux axes 4 et 5 ont été déconstruits jusqu'au niveau des voutes avant que les travaux de déconstruction de noyau et du parement intérieur du mur sud ne débutent. Ayant pris connaissance en chantier d'un liaisonnement partiel par chaînage de pierres entre ces murs de refend et le mur sud, l'impact de la déconstruction des murs de refend sur le mur sud peut en effet ne pas avoir été négligeable en raison de ce lien physique les reliant.

2019-02-28

Rapport d'expertise - Version finale

Ceci étant dit, nous croyons que les impacts irréversibles des vibrations sur le parement de pierres extérieur et sur les sections de noyau fraîchement remontées étaient **incontournables et prévisibles** et sont, malheureusement, en bonne partie associés à la volonté de préservation du parement. Dans ce contexte, nous croyons que l'équipement choisi était le bon, de manière à garantir le meilleur ratio vibrations / efficacité afin d'atteindre les objectifs de démontage souhaités. Nous ne pensons pas qu'il eut été justifié de choisir des équipements plus légers, tel un marteau piqueur électrique, pour la déconstruction. Le mortier de liaisonnement utilisé à l'époque (et subséquentement dans le bâtiment) avait des compositions souvent aléatoires, c'est-à-dire qu'on pouvait retrouver des secteurs où la teneur en chaux était assez élevée, d'où des résistances moins grandes, et d'autres secteurs, où la teneur en chaux était faible et celle en ciment plus forte (utilisé pour des travaux de réfection), ce qui donnait des mortiers beaucoup plus durs. Dans ce dernier cas, le lien de maçonnerie entre les pierres est plus fort et l'énergie requise pour séparer les pierres est plus importante, de là l'utilisation de marteaux pneumatiques.

Ceci étant dit, il est important de nuancer le rôle et les effets des outils utilisés pour la déconstruction de la maçonnerie. Le choix de l'outil de déconstruction et ses effets ont une importance sur la qualité de préservation des ouvrages adjacents, certes, mais la séquence de travail en a une tout aussi importante. En fait, tel que discuté dans les sections précédentes, la volonté de travailler le noyau et le parement extérieur en deux temps implique à un moment ou l'autre des travaux de déconstruction, de l'étalement temporaire et des transferts de charges. En priorisant une intervention sur le parement extérieur du mur sud en premier, les interventions visant à éviter les joints jusqu'à 75 mm de profondeur avec des outils pneumatiques et les travaux de déconstruction des murs de refend aux axes 4 et 5 ont nécessairement eu un impact négatif sur l'état de consolidation des pierres de parement et de leur liant avec leur noyau.

En se projetant dans le temps, la phase d'intervention subséquente, consistant à déconstruire le noyau intérieur une fois le parement extérieur restauré, aurait engendré des impacts encore plus importants. En effet, il était prévu de travailler sur le noyau une fois la majorité du parement restauré. Cette stratégie aurait été très nuisible pour la maçonnerie du parement nouvellement restauré puisque les vibrations de démolition auraient contribué à désolidariser involontairement les pierres entre elles, ce qui n'est évidemment pas souhaitable. Par contre, au moment de l'incident, nous ne pensons pas que les travaux intérieurs étaient avancés à ce point que cette hypothèse soit attribuable dans la zone ciblée par l'expertise.

Il est important d'établir le lien entre l'impact des interventions sur les éléments de maçonnerie et l'impact sur la sécurité du site et des travailleurs qui s'affairent à réaliser les travaux. La déconsolidation provoquée sur la maçonnerie lorsque vibrée pour procéder à son démantèlement a inévitablement un impact sur la sécurité du site au droit des interventions. En effet, la sécurité du site est directement associée à la stabilité des ouvrages en cours de restauration dans ce type d'interventions. L'effet est direct : lorsque la stabilité de l'ouvrage est atteinte, les risques de rupture augmentent et le niveau de sécurité des travailleurs est diminué. **Typiquement, les ruptures pour ce type d'ouvrage de maçonnerie sont fragiles, soudaines et sans avertissement.**

## VOLET 4 – AVIS SUR LES TECHNIQUES DE TRAVAIL

### ÉTAT DE LA MAÇONNERIE – OBSERVATIONS EN COURS DE CHANTIER

Au niveau du mur sud, il était déjà convenu que le noyau de calcaire et le parement intérieur, aussi en calcaire, devaient être déconstruits en bonne partie, en partant de l'assise du mur de fondation jusqu'au niveau de la toiture. Pour le parement extérieur, les interventions prévues consistaient à intervenir sur la pleine profondeur, sur environ 20 % de la surface du mur sud. Pour la portion restante, soit environ 80 %, il était prévu de réaliser une dépose de l'enduit cimentaire, un nettoyage de la pierre, vider les joints, réaliser un remplacement de pierres ponctuellement où requis, rejointoyer et poser l'enduit.



2019-02-28

Rapport d'expertise - Version finale

De ce que nous avons pu comprendre des documents de chantier, aucune situation n'a été observée au chantier qui modifiait de manière importante les interventions prévues aux plans et devis. Dans un cas, des blocs de béton et des briques ont été trouvés dans la section de mur, dans d'autres, une zone de maçonnerie plus déconsolidée que prévu, mais dans l'ensemble, la stratégie d'intervention était conservée.

Notre équipe a été en mesure d'évaluer visuellement la composition et l'état de la maçonnerie du mur sud dans des zones où la maçonnerie n'avait pas subi d'intervention. De façon générale, nous avons observé que la composition était fidèle aux informations fournies par les professionnels au dossier. En effet, la qualité de la préservation du noyau semble relativement hétérogène puisqu'à certains endroits, on retrouve une maçonnerie assez bien consolidée et avec une bonne cohésion mortier-pierre, mais à d'autres endroits, c'est l'inverse. Dans ces zones, deux phénomènes de dégradation sont visibles : le premier phénomène traite de l'état du mortier et le second de l'état de la pierre du massif. À plusieurs endroits, l'état du mortier présente des signes de dégradation associée probablement à une grande série de cycles de gel et de dégel du cœur du mur et à l'infiltration d'eau. Ce phénomène lessive le mortier et élimine souvent dans un premier temps les particules fines. Selon la teneur en chaux du mortier, il est possible que cette dernière demeure à une proportion suffisante pour assurer une cohésion minimale, lorsque séchée (une réactivation). L'emprisonnement de l'humidité dans le centre du mur a certainement contribué à créer des lentilles de gel multiples et altérer irréversiblement les composants. Nous avons aussi remarqué un décollement régulier du mortier aux surfaces de pierres de noyau, ce qui serait vraisemblablement associé au phénomène décrit ci-haut.

Le second phénomène de dégradation que l'on retrouve dans le massif est au niveau des pierres du noyau. Nous avons constaté la présence de deux types de pierres, soit une pierre calcaire de la Côte-de-Beaupré (type Château-Richer) et une pierre de schiste noire (pierre noire du Cap). Nous retrouvons des fissures dans la pierre calcaire, mais c'est au niveau de la pierre noire du Cap que nous retrouvons le plus de dégradation. En effet, il s'agit de délaminations multiples de la pierre sous l'effet du gel des lentilles d'eau à l'intérieur du mur. Ce type de pierre est très vulnérable aux effets du gel et son rendement à long terme est souvent problématique lorsque l'ouvrage est mal construit ou mal protégé. La présence de fissures dans la pierre de noyau n'est pas normale et représente un signe de dépassement de contraintes causé par des surcharges ou des pressions interstitielles élevées amenées par les lentilles de gel. Il est important aussi de mentionner que les deux incendies majeurs qu'a vécu le bâtiment auraient entraîné des conséquences désastreuses dans les éléments de maçonnerie. Ce n'est pas nécessairement la chaleur du feu qui affecte les éléments de pierres, mais plutôt, l'arrosage lors des incendies (le cas échéant) et les effets du gel de l'eau dans le mur au cours des hivers suivant les événements. Le bâtiment se retrouve non protégé, non chauffé, saturé d'eau et très vulnérable aux effets du gel.

La phase de chantier et les travaux d'excavation qui y sont associés ont aussi permis d'exposer les fondations de pierres. De ce qui a été possible d'observer, la stratégie prévue aux plans et devis demeurait applicable. Ces fondations sont constituées de moellons de pierres calcaires agissant de noyau et d'un rang de pierres calcaires de Beauport extérieur de même type dont l'appareil est assisé. Aucune protection de ce parement n'était visible au moment de leur exposition.

## INTERVENTIONS – LES PLANS VERSUS LE CHANTIER

Avant de présenter une opinion sur les technicalités de la situation, il est essentiel de réaliser **une corrélation entre la nature des travaux prévus aux plans et devis versus la situation rencontrée au chantier**, ou dans d'autres termes, **valider la constructibilité et la justesse des intentions de conception**.

2019-02-28

Rapport d'expertise - Version finale

De prime abord, l'approche des plans et devis imposait à l'entrepreneur de prévoir une stratégie permettant de laisser en place une bonne portion de la surface du parement extérieur, tout en permettant le démontage et la reconstruction du noyau du mur et du parement intérieur. Il était, soit dit en passant, aussi prévu de démonter et reconstruire en entier les murs de refend transversaux aux axes 4 et 5, sans toutefois fournir de séquence. L'intervention était selon nous réalisable, mais **représentait un niveau de complexité pouvant entraîner un certain risque**. D'abord, il faut comprendre que pour un mur de ce type, les pierres de parement extérieur et le noyau **sont solidaires puisqu'ils ont été montés dans un même temps**. L'épaisseur totale du mur permet d'atteindre une capacité structurale suffisante à les maintenir stables latéralement et à résister sans crainte à leur propre poids et aux charges d'utilisation des étages supérieurs. Cependant, les nombreuses ouvertures dans les sections de murs à consolider augmentent la complexité des interventions puisqu'elles ne permettent aucune redondance dans le système et dans le transfert de charges. Par conséquent, l'opération de traiter **indépendamment les deux épaisseurs de murs de maçonnerie** lors de la restauration de surface (parement) et de la reconstruction (noyau et parement intérieur) est risquée et **augmente les probabilités d'incidents ou de rupture ponctuelle, si l'opération est mal planifiée**.

Au niveau de l'aspect de la constructibilité de l'opération, nous comprenons que l'objectif des professionnels de **travailler en épaisseurs sur une section type de mur aussi mince a été conservé tout au long des premières étapes des travaux, et ce, jusqu'à la date de l'accident**. Le travail prévu en deux volets sur une même section de mur de maçonnerie complexifie l'intervention, **augmente les risques de problématiques associés aux nombreux transferts de charges**, sacrifie le niveau de **qualité d'exécution et allonge l'échéancier de travaux**.

Toujours en lien avec l'intervention prévue et les conditions rencontrées en chantier, le choix des méthodes de travail et l'impact des outils pneumatiques **ont sans doute eu un impact sur le parement extérieur lors de la déconstruction ponctuelle de ce dernier, du noyau en partie et des murs de refend**. Il en sera discuté de manière plus élaborée dans les sections suivantes.

Il est important de préciser qu'en cours de déconstruction, il a été constaté que contrairement à ce qu'il était prévu lors de la période des plans et devis et en début de chantier, le mur sud n'était pas complètement détaché des murs de refend transversaux. En effet, il a été observé que certaines pierres de liaisonnement reliaient les deux sections de murs dans la partie plus centrale des murs de refend (leur cœur). Bien que certaines pierres de boutisse étaient présentes dans le cœur du mur, nous avons constaté que la présence de mortier de liaison était faible, voire nulle dans la constitution de cette maçonnerie, d'autant plus que le type de pierre du cap retrouvée dans le mur à ces endroits avait démontré un état de dégradation avancé (voir photo n° 6). Cet aspect de liaisonnement fortuit est très complexe à quantifier et compte-tenu de son état de dégradation, nous ne pensons pas que sa contribution ait eu un impact positif significatif sur le liaisonnement du mur sur et des murs transversaux.

Il est très difficile de déterminer si ce liaisonnement fortuit aurait pu être observé avant les travaux puisque selon les diverses situations observées sur place, seule une ouverture profonde à la jonction des murs aurait permis de définir la composition du cœur.

2019-02-28

Rapport d'expertise - Version finale



Photo n° 6 : État des pierres de liaisonnement au cœur du mur transversal de l'axe 4

## ÉTAIEMENT ET MÉTHODOLOGIE

D'abord, décrivons ce qu'est la méthode, dont le terme est couramment utilisé, de démontage et de remontage en *quinconce*. Cette méthode utilisée depuis les tous débuts par les maçons est priorisée dans des situations où les **éléments de murs sont réguliers, sans trop d'ouvertures et dont les conditions de la maçonnerie sont relativement régulières**. La méthode consiste donc à réaliser par intervalle en alternance des baies de démontage tout en conservant des baies intégrales qui servent à reprendre la charge qui n'est plus en mesure de descendre dans les sections de maçonnerie déconstruites. Normalement, le patron de démontage doit être régulier et d'une largeur relativement équivalente à la largeur de la maçonnerie conservée de manière à ne pas excéder les contraintes admissibles dans les constituants de la maçonnerie.

Les plans d'étalement et les attestations de conformité se sont faits en deux temps au chantier. Au niveau de l'étalement intérieur, une méthode d'intervention était proposée à l'entrepreneur, mise en place conformément aux plans soumis et attestée par le professionnel au projet (WSP) une fois sa mise en place complétée.

Au niveau de l'étalement des murs de maçonnerie extérieurs, la stratégie était différente. Ce que nous en comprenons, les travaux de maçonnerie (et d'étalement) étaient réalisés par phase et en quinconce. Au besoin, à la demande de l'entrepreneur, une visite des lieux pour attestation de conformité était faite par :  
Aucun plan n'était produit pour ce volet. Les inspections de : étaient faites sur place, de manière visuelle et une attestation écrite était émise. Il s'agissait plus spécifiquement d'étalement de pierres, c'est-à-dire d'ajout de supports verticaux de bois dans le plan des éléments de maçonnerie retirés.

2019-02-28

Rapport d'expertise - Version finale

Selon notre compréhension des faits, plusieurs aspects du mur sud et des ouvrages périphériques nous laissent croire que les travaux d'intervention en quinconce sur le mur de maçonnerie massive sud étaient à proscrire. Nous sommes d'avis qu'en raison des conditions énumérées précédemment, il devenait risqué de réaliser des travaux de démontage sans appui temporaire, en se fiant uniquement à la reprise des charges gravitaires par les éléments de maçonnerie latéraux. En complément, puisqu'il était déjà connu qu'une bonne partie du mur sud était désolidarisée des voutes et en bonne partie des murs porteurs perpendiculaires, l'idée de transférer efficacement les charges aux éléments secondaires avec la simple méthode en *quinconce* était risquée et difficile à contrôler.

Nous ne pouvons dire que la méthode de déconstruction utilisée au droit des fondations entre les axes 3 et 4 était une méthode typique de travail en *quinconce*. En effet, compte tenu de la non-symétrie des éléments de maçonnerie latéraux, la présence du vide occasionné par le saut-de-loup et la trop large zone de démolition, il n'y avait aucune possibilité pour les charges provenant de toute la hauteur du mur de cheminer de manière contrôlée dans les éléments de maçonnerie intermédiaire. En fait, nous ne pouvons pas dire que la méthode de travail utilisée pour la déconstruction de ce secteur était la méthode en *quinconce*, tel que possiblement imaginé par les maçons sur place.

Toujours en lien avec la méthode de travail en *quinconce*, rappelons qu'elle est applicable sur des murs de maçonnerie massive de bonne longueur, de manière régulière et répétitive, dont l'état est relativement bien maîtrisé et dont la disposition des ouvertures permet quand même un bon transfert de charges d'une phase à l'autre. Dans le cas présent, connaissant les conditions en place, une méthode de travail en *quinconce* combinée avec la mise en place d'étais réguliers aurait été possible et aurait probablement donné de meilleurs résultats.

Il est aussi curieux que l'entrepreneur ait décidé de débiter les travaux de restauration par la partie supérieure du mur (à partir du niveau du rez-de-chaussée) via la consolidation et le rejointoiement du parement de grès. Sachant qu'il allait poursuivre des travaux au niveau des fondations sur la pleine épaisseur du massif, la stratégie de réalisation est très questionnable. En effet, il devient risqué d'agir ainsi sachant que la maçonnerie nouvellement restaurée dans la partie supérieure subit des impacts, des vibrations et une réorganisation temporaire des contraintes internes en raison des travaux inférieurs en seconde phase. Il aurait été plus logique et sans doute plus sécuritaire pour les travailleurs de débiter les travaux sur la pleine profondeur du massif des fondations dans un premier temps.

## PISTES DE RÉFLEXION ET BONIFICATION DES INTERVENTIONS

### Conception initiale

L'intervention prévue sur les murs de maçonnerie sud et transversaux s'avérait délicate dès le départ, considérant les nombreuses ouvertures, l'état de déconsolidation, les insertions de linteaux en béton et les conditions de détachements du mur aux éléments intérieurs. Sur papier, l'idée et la stratégie fonctionnent, laissent présager des résultats satisfaisants et surtout l'atteinte des objectifs de conservation. C'est au niveau de la constructibilité où le choix des interventions complexifie l'organisation de chantier, les méthodes de travail, le chevauchement des activités, la gestion des transferts de charges, etc.

Le concept initial aurait dû être mieux adapté au volet construction, de concert avec l'ensemble des intervenants au dossier. Dans l'objectif d'améliorer le succès des interventions et **nécessairement la sécurité des ouvriers qui s'affairent aux travaux**, quelques avenues auraient pu être évaluées au moment de la conception :

- Évaluer la possibilité de démonter 100 % du parement et procéder à une numérotation totale ou partielle des pierres afin d'assurer un remontage similaire. Quoique très difficile à réaliser dans cette proposition d'appareillage irrégulier, cette approche de démontage intégrale limite au minimum les risques de défaillance dans le système de support temporaire et élimine les problèmes de gestion des descentes de charges.



2019-02-28

Rapport d'expertise - Version finale

- Implanter un système de retenue du parement extérieur, par baie, à l'aide d'une cage d'acier temporaire et globale, et privilégier la reconstruction simultanée du noyau et du parement intérieur de la baie dans un même premier.
- Travailler en bandes colonnes alternées de 1,0 à 1,5 mètre maximum et limiter les charges à supporter. Intégrer un système hybride de poteaux temporaires dans les ouvertures afin d'assurer la stabilité du mur.
- Développer un système de liaisonnement à l'aide d'ancrages spéciaux à maçonnerie qui auraient été mis en place dès le départ, permettant un lien physique fort entre le mur sud, les voutes et les murs transversaux. Ce système permanent aurait pu faire une différence sur la tenue du mur sud et son intégrité par rapport à l'ensemble de l'ouvrage.

### Stratégie d'étalement aux plans et devis

Les plans montrent certains principes d'étalement du mur sud selon les travaux projetés et le devis, spécifiquement la section 04 03 43, présente les exigences auxquelles l'entrepreneur spécialisé et devaient se plier.

L'esprit des plans et devis était basé en bonne partie sur une approche « en performance » en lien avec les travaux d'étalement temporaires et de méthodologie de travail applicable au mur sud. L'entrepreneur demeure, dans l'esprit des documents, l'unique responsable de sa stratégie d'intervention, en autant que l'objectif final soit atteint. Cette approche est assez universelle et donne le choix à l'entrepreneur et ses sous-traitants des méthodes d'interventions. mandaté par le sous-traitant doit, normalement, attester les interventions et/ou fournir les documents exigés par les professionnels.

Nous croyons que l'approche « en performance » pour le volet associé à l'étalement temporaire a encore sa place dans plusieurs situations, mais qu'elle doit être évitée ou adaptée dans certains cas. En effet, dans le cas spécifique du mur sud du bloc 1, compte tenu du type d'interventions invasives et irrégulières, des nombreuses ouvertures et de la volonté de conservation du parement, nous croyons qu'une méthode d'intervention plus spécifique et mieux adaptée visant à orienter l'entrepreneur spécialisé aurait pu être proposée ou imposée initialement aux plans. aurait pu mieux illustrer certains principes de supports adaptés au mur sud, émettre des restrictions et imposer des balises de mise en place.

Malgré tout, les informations traitant de l'étalement temporaire aux plans et au devis fournissaient plusieurs détails pertinents et d'exigences importantes auxquels l'entrepreneur spécialisé et étaient censés se conformer. Or, rien n'indique que ces exigences ont été respectées en chantier lors des travaux de démontage.

### Chantier

Conformément à ce qui était demandé aux plans et devis, nous sommes d'avis que si la présence de avait été plus régulière et qu'il avait fourni l'ensemble des attestations exigées avant les opérations, le niveau de risque aurait été abaissé de manière non négligeable. En effet, n'eut été que de l'émission de dessins d'atelier plus élaborés, avec descriptions des méthodes de travail, appuyées par un plan de travail et un suivi rigoureux de la part de ; la sécurité des employés œuvrant à démanteler l'ouvrage n'aurait pas été uniquement associée au niveau de compétence du et du et de , mais bien à celui .



2019-02-28

Rapport d'expertise - Version finale

## CONCLUSION

La CNESST a mandaté Tetra Tech de manière à réaliser une analyse technique de l'événement du 14 mai 2018 où une section du mur sud entre les axes 3 et 4 s'est effondrée pendant les travaux de démontage de la maçonnerie. L'analyse a démontré que l'effondrement a été causé par une rupture en cisaillement ou en compression de la maçonnerie sous l'effet des contraintes induites à l'appui du linteau. Les contraintes excessives dans la maçonnerie déconsolidée ont eu le dessus sur les résistances des ouvrages résiduels encore en place malgré la déconstruction. Une série d'événements et de mauvaise planification ont fait en sorte que la section de mur a été laissée à elle-même, sans appui temporaire, sans inspection et sans procédure officielle provenant d'un professionnel. Le mandat d'expertise réalisé par Tetra Tech, en support à l'investigation de la CNESST vise aussi indirectement à présenter les approches de travail pour ce type d'intervention et à générer une réflexion sur l'importance du respect des procédures prescrites par les professionnels.

La qualité de réalisation et la sécurité des interventions prévues sur des ouvrages de maçonnerie historiques sont fonction de plusieurs facteurs qui découlent autant des orientations de préconception que des choix de design ou alors des procédures d'intervention en chantier. La compétence des intervenants, peu importe la phase du projet et le corps de métier, est aussi fondamentale et il est impératif d'assurer une qualification rigoureuse des ressources afin que la qualité des travaux s'y reflètent.

2019-02-28

Rapport d'expertise - Version finale

**ANNEXE 1 – EXTRAITS DE PLANS ET DEVIS PERTINENTS**



**Division Bâtiment**  
4655, boulevard Wilfrid-Hamel, Québec (Québec) G1P 2J7

[tetrattech.com](http://tetrattech.com)

## ANNEXE D

### Relevé météo

<p>Accueil → Environnement et ressources naturelles → Météo, climat et catastrophes naturelles → Conditions météorologiques et climatiques passées → Données historiques</p>										
<p>Rapport de données horaires pour le 14 mai 2018</p>										
<p>Toutes les heures sont exprimées en heure normale locale (HNL). Pour convertir l'heure locale en heure avancée, ajoutez 1 heure s'il y a lieu.</p>										
<p>QUEBEC/JEAN LESAGE INTL QUÉBEC Opérateur de station opérationnelle : ECCC - BMC</p>										
Latitude :	45°48'13,000" N									
Longitude :	71°22'54,000" O									
Altitude :	60,00 m									
ID climatologique :	7018001									
ID de l'OMM :	71714									
ID de TC :	WQB									
	Temp. °C ℉	Point de rosée °C ℉	Hum. rel. %	Dir. du vent 10's deg	Vit. du vent km/h ℉	Visibilité km ℉	Pression à la station kPa ℉	Hmdx	Refr. éolien	Météo
HEURE										
00:00	5,1	2,1	81	32	2		100,39			ND
01:00	3,6	1,1	84	33	2		100,35			ND
02:00	2,6	-0,2	82	31	2		100,30			ND
03:00	2,9	0,4	84	31	3		100,28			ND
04:00	7,2	1,4	67	24	7		100,26			ND
05:00	7,9	2,8	70	26	7		100,30			ND
06:00	11,4	4,3	61	24	10		100,31			ND
07:00	13,1	6,9	66	24	15		100,27			ND
08:00	15,4	8,9	65	24	20		100,21			ND
09:00	17,4	8,5	56	25	23		100,18			ND
10:00	18,3	7,5	49	24	19		100,12			ND
11:00	19,5	7,0	44	25	22		100,08			ND
12:00	20,5	5,9	38	24	19		100,02			ND
13:00	22,7	3,6	29	24	24		99,95			ND
14:00	23,8	3,7	27	24	24		99,87			ND
15:00	24,4	3,2	25	25	28		99,81			ND
16:00	24,6	3,3	25	23	20		99,77			ND
17:00	24,3	3,7	26	24	22		99,75			ND
18:00	23,7	2,7	25	23	14		99,73			ND
19:00	19,7	4,2	36	25	11		99,77			ND
20:00	18,8	4,1	38	25	9		99,83			ND
21:00	17,7	5,4	44	27	12		99,94			ND
22:00	15,7	3,6	44	4	2		99,97			ND
23:00	15,6	4,6	48	11	5		99,95			ND
Légende										
• E = Valeur estimée	• ND = Non disponible									
• M = Données manquantes										

Source : Environnement Canada



**ANNEXE E**

## Références bibliographiques

ACTION PATRIMOINE. *Fondation*, [En ligne], [<https://actionpatrimoine.ca/outils/fiches-techniques/fondation-2/>] (Consulté le 27 juin 2018).

ADDISON, John. *Underpinning*, [En ligne], [<https://www.buildingconservation.com/articles/underpinning/underpinning.htm>] (Consulté le 14 novembre 2018).

ALMEIDA, João Manuel de. *Stabilisation de murs en réhabilitation*, Mémoire (M.A.), Conservatoire national des arts et métiers, Lorraine, Centre d'enseignement de Metz, 2012, 114 p. [En ligne]. [<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01234632/document>] (Consulté le 13 novembre 2018).

ANUMBA, Chimay, Charles EGBU et Mukesh KASHYAP. « Avoiding structural collapses in refurbishment: a decision support system », [En ligne], [Bootle, UK], Health & Safety Executive, 2006, x, 112 p. (Research Report ; 463). [<https://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr463.pdf>] (Consulté le 18 février 2019).

ASSOCIATION OUVRIÈRE DES COMPAGNONS DU DEVOIR (FRANCE). *La maçonnerie et la taille de pierre*, Paris, Librairie du compagnonnage, 1997-2000, tome 6, *Le savoir-faire*, 12 fasc. (627 p.). (Encyclopédie des métiers).

CENTRE D'ÉLABORATION DES MOYENS D'ENSEIGNEMENT DU QUÉBEC. *Briquetage-maçonnerie : guide d'apprentissage*, 2e éd., [Sherbrooke], CEMEQ, 2010, module 8, *Ouvrages simples*, 126 p.

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION. *Le rempiètement de fondations existantes*. [En ligne], paru en juin 2015. [<https://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=infofiches&pag=72&art=1>] (Consulté le 20 novembre 2018).

COMMISSION DE LA CONSTRUCTION DU QUÉBEC. *Métier : briqueteur-maçon / briqueteuse-maçonne*, [En ligne], [<https://www.ccq.org/~media/PDF/Communications/Metiers/Briqueteur.pdf>] (Consulté le 18 avril 2019).

COMMISSION DE LA SANTÉ ET DE LA SÉCURITÉ DU TRAVAIL. *Prévenir l'effondrement des ouvrages temporaires et des structures inachevées*, [En ligne], [Québec], CSST, [2008], 1 dépliant. [[https://www.cnesst.gouv.qc.ca/Publications/100/Documents/DC\\_100\\_1097\\_1.pdf](https://www.cnesst.gouv.qc.ca/Publications/100/Documents/DC_100_1097_1.pdf)] (Consulté le 9 janvier 2019).

CULTURE ET PATRIMOINE DESCHAMBAULT-GRONDINES. *Les fondations et les murs de pierre*, [En ligne]. [<http://www.culture-patrimoine-deschambault-grondines.ca/les-fondations-et-les-murs-de-pierre.php>] (Consulté le 13 novembre 2018).

ÉCOLE DES METIERS DE LA CONSTRUCTION DE MONTREAL. *Restauration de maçonnerie*, [En ligne]. [<http://ecole-metiers-construction.csdm.ca/programme/restauration-de-maconnerie/>] (Consulté le 12 décembre 2018).

FILIP, Ray K. « Temporary Works Toolkit. Part 10: Propping and needling », [En ligne], *The Structural Engineer: journal of the Institution of Structural Engineer*, vol. 95, n° 4, 2017, p. 30-35. [<https://www.istructe.org/IStructE/media/Public/TSE-Archive/2017/ca6f9c33-d4e6-4f29-8706-fae4a5ba1c7e.pdf>]. (Consulté le 18 février 2019).

GÉNIVAR. *Étude sur le maintien d'actifs des Nouvelles-Casernes*, Québec, Génivar, 2011, 63 p.

IRELAND. DEPARTMENT OF THE ENVIRONMENT, HERITAGE AND LOCAL GOVERNMENT. *Ruins : the conservation and repair of masonry ruins*. [En ligne], Dublin, Stationery Office, c2010, 72 p. [<https://www.chg.gov.ie/app/uploads/2015/07/Ruins-The-Conservation-and-Repair-of-Masonry-Ruins-2010.pdf>]. (Consulté le 14 novembre 2018).

ORDRE DES INGÉNIEURS DU QUÉBEC. *Guide de surveillance des travaux*, [En ligne]. [[http://oiq.qc.ca/Documents/DSIP/20181012\\_Guide\\_surveillance\\_travaux.pdf](http://oiq.qc.ca/Documents/DSIP/20181012_Guide_surveillance_travaux.pdf)]. (Consulté le 18 avril 2019).

PAQUETTE, Louis-Gabriel. *Caractérisation des bâtiments comprenant de la maçonnerie non renforcée et de leurs propriétés dynamiques*. Mémoire (M. Sc.), Université de Sherbrooke, 2011, xvi, 102 p. [En ligne]. [<https://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/1621/MR83722.pdf?sequence=1>] (Consulté le 12 novembre 2018).

POPINET, Alain. *Traité de maçonnerie ancienne : calculs, matériaux, diagnostic et réhabilitation*. Antony, Éditions Le Moniteur, 2018, 415 p. (Moniteur référence technique).

QUÉBEC. *Code de sécurité pour les travaux de construction, chapitre S-2.1, r. 4, à jour au 15 novembre 2017*, [En ligne], [Québec], Éditeur officiel du Québec, 2018. [<http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/showdoc/cr/S-2.1,%20r.%204>] (Consulté le 29 août 2018).

QUÉBEC. *Loi sur la santé et la sécurité du travail, chapitre S-2.1, à jour au 1<sup>er</sup> mars 2019*, [En ligne], [Québec], Éditeur officiel du Québec, 2019. [<http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cs/S-2.1>] (Consulté le 18 avril 2019).

SYNDICAT NATIONAL DES ENTREPRENEURS SPÉCIALISTES DE TRAVAUX DE RÉPARATION ET DE RENFORCEMENT DES STRUCTURES. *Réparation et renforcement des maçonneries : réparation et renforcement structuraux*, version 2, [En ligne], [Paris], STRRES, 2016, 313 p. (Guide FABEM ; 6.3). [[http://www.strres.org/fichier-utilisateur/fichiers/FABEM/FABEM\\_6\\_3\\_V2.pdf](http://www.strres.org/fichier-utilisateur/fichiers/FABEM/FABEM_6_3_V2.pdf)] (Consulté le 20 juin 2018).

VARIN, François. *Maçonnerie traditionnelle : Île-d'Orléans 23 mai 2013*, Île-d'Orléans, MRC de Île-d'Orléans, 2013, 17 p. [En ligne], [<http://mrc.iledorleans.com/stock/fra/conference-maonnerie.pdf>] (Consulté le 26 juin 2018).

*La maçonnerie de pierre*, [En ligne], [Québec], Ville de Québec, Service de l'urbanisme en collaboration avec le Service des communications, [1989], 23 p. (Maître d'œuvre. Guide technique ; 6) [[https://www.ville.quebec.qc.ca/citoyens/propriete/docs/patrimoine/guide\\_tech06.pdf](https://www.ville.quebec.qc.ca/citoyens/propriete/docs/patrimoine/guide_tech06.pdf)] (Consulté le 16 mai 2018).