



ISOLATION PAR L'INTÉRIEUR DES ÉDIFICES PATRIMONIAUX EN MAÇONNERIE MASSIVE

Un guide condensé des pratiques
exemplaires pour réduire les risques de
dommages causés par le gel et le dégel

Novembre 2022



Services publics et
Approvisionnement Canada

Public Services and
Procurement Canada

Canada



Figure 1 : Une photo des travaux de maçonnerie intérieurs effectués pour l'Édifce du Centre.

Available in English under the title: Insulating Heritage Mass Masonry Buildings from the Interior: A Condensed Best Practice Guide to Mitigate Risk of Freeze-Thaw Damage - 2022

© Sa Majesté le Roi du chef du Canada, représenté par la ministre des Services publics et de l'Approvisionnement du Canada, 2023.

Publié par Services publics et Approvisionnement Canada (SPAC), 2023.

La présente publication peut être reproduite à des fins non commerciales seulement. Veuillez au préalable obtenir une permission écrite de SPAC si vous désirez faire usage de ce document à toute autre fin.

Pour obtenir de plus amples renseignements, communiquez avec la :
Direction de la science et de l'infrastructure parlementaire
TPSGC.DGSIPEngagement-SPIBEngagement.PWGSC@tpsgc-pwgsc.gc.ca

Cat.: P4-117/2023F-PDF
ISBN : 978-0-660-48444-0



Figure 2: Le site d'excavation situé devant l'édifice du Centre et l'édifice de l'Est.

RECONNAISSANCE

Ce guide a été élaboré par la Direction générale de la science et de l'infrastructure parlementaire (DGSIP) de Services publics et Approvisionnement Canada (SPAC) avec le soutien financier du Fonds pour l'écologisation du gouvernement. Ce guide est une version condensée du guide technique publié par le Conseil national de recherches du Canada en 2022 sur l'isolation de l'intérieur des édifices patrimoniaux en maçonnerie massive : guide des pratiques exemplaires pour atténuer les risques de dommages causés par le gel et le dégel. Les versions technique et condensée du guide ont été élaborées en collaboration avec les groupes suivants :

- Conseil national de recherches du Canada (CNRC);
- Services immobiliers (SI) de Services publics et Approvisionnement Canada (SPAC);
- Musée canadien de la nature;
- Centre mondial du pluralisme;
- Morrison Hershfield;
- Crosier Kilgour et partenaires.

TABLE DES MATIÈRES

Introduction	1
Contexte.....	1
But.....	2
Aperçu.....	3
Étape 1 : Évaluation avant mise à niveau	4
Examen des renseignements sur l'immeuble avant l'inspection	4
Inspections des lieux.....	4
Essais de rendement sur le site	5
Étape 2 : Collecte des données de gel et de dégel	7
Étape 3 : Optimisation de la quantité d'isolation intérieure	10
Modélisation énergétique de l'ensemble de l'immeuble	11
Établir des critères de rendement : Méthode de la durabilité au gel et au dégel.....	12
Modélisation hygrothermique (durabilité à long terme).....	14
Étape 4 : Mise à niveau intégrale	16
Étape 5 : Programme de surveillance après la mise à niveau	17
Conclusion et possibilités futures	20
Glossaire	21
Glossaire visuel	22
Référence des schémas	23

INTRODUCTION

CONTEXTE

Le gouvernement du Canada, au moyen de la Stratégie pour un gouvernement vert, a défini des cibles de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) de plus en plus ambitieuses pour son portefeuille immobilier. Lancée en 2017 et mise à jour en 2020, la Stratégie pour un gouvernement vert engage le gouvernement du Canada à réduire les émissions de GES de 40 % par rapport au niveau de 2005 d'ici 2025, et d'au moins 90 % par rapport au niveau de 2005 d'ici 2050. Les ministères fédéraux doivent s'assurer que tous les travaux de modernisation importants d'immeubles, y compris les projets de réhabilitation des édifices du patrimoine, donnent la priorité à la réduction des émissions de carbone et à la résilience aux changements climatiques.

Pour les édifices patrimoniaux dont les caractéristiques architecturales uniques de la façade sont des éléments déterminants, le respect de ces exigences ambitieuses en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre et des exigences modernes de confort thermique pour les occupants de l'édifice implique généralement l'ajout d'une isolation à l'intérieur des murs et des toits.

Il a été largement déterminé que, pour un édifice patrimonial en maçonnerie massive, l'ajout d'une isolation à l'intérieur de l'édifice risque de rendre la maçonnerie extérieure plus froide et plus humide pendant la saison hivernale. Cela peut augmenter le risque de dommages causés par le gel et le dégel à l'extérieur, ce qui risque de compromettre la durabilité à long terme des caractéristiques qui définissent le patrimoine. C'est pourquoi, depuis longtemps, on a pour principe d'éviter d'ajouter de l'isolation à l'intérieur des édifices patrimoniaux en maçonnerie massive.

Cependant, les récentes innovations dans les méthodes de laboratoire pour prédire le risque de gel et de dégel, les simulations numériques et les projections climatiques futures se combinent pour faire de ce moment un moment opportun pour explorer une méthode permettant d'atteindre un équilibre optimal entre la conservation du patrimoine et les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre pour la réhabilitation d'édifices patrimoniaux. Grâce à un meilleur rendement thermique de l'enveloppe de bâtiment, les émissions de gaz à effet de serre peuvent être réduites tout en maintenant la durabilité et en respectant les éléments caractéristiques de l'édifice patrimonial.



Figure 1 : L'élévation est de l'édifice de l'Ouest avant la réhabilitation [1]



Figure 2 : L'élévation est de l'édifice de l'Ouest après la réhabilitation [1]

BUT

Le guide condensé d'amélioration thermique de l'enveloppe des édifices du patrimoine (ci-après dénommé « ce guide ») fournit une méthode sur la façon d'aborder l'isolation des murs de maçonnerie extérieurs des édifices patrimoniaux par l'intérieur tout en réduisant le risque de dommages causés par le gel et le dégel. Souvent, les élévations extérieures des édifices patrimoniaux désignés sont des éléments caractéristiques, ce qui élimine la possibilité d'ajouter de l'isolation par l'extérieur de l'édifice.

Si un immeuble de maçonnerie patrimoniale n'est pas isolé, la température intérieure de l'immeuble maintient la maçonnerie à une température relativement chaude et facilite le séchage. L'ajout d'une isolation du côté intérieur d'un mur extérieur en maçonnerie empêche la chaleur intérieure de réchauffer cette maçonnerie pendant les mois froids. Cet effet peut entraîner un risque accru de dommages en raison d'un nombre plus élevé de cycles de gel et de dégel subis par la maçonnerie plus froide. La baisse de température peut entraîner la formation de glace dans les pores de la maçonnerie (cycles critiques de gel et de dégel), ce qui peut conduire à l'écaillage et à la fissuration (dommages dus au gel et au dégel), compromettant ainsi la durabilité à long terme de l'immeuble. Les risques liés aux cycles de gel et de dégel peuvent être réduits en limitant la quantité d'isolant selon une analyse détaillée, en conjonction avec d'autres mesures.

Les pratiques exemplaires peuvent être continuellement mises à jour, révisées et ajoutées à ce guide au fur et à mesure de leur élaboration. Ce guide condensé s'appuie sur des connaissances obtenues à partir de sources en constante évolution, notamment des études de cas, des consultations avec le secteur privé et des travaux effectués dans la Cité parlementaire du Canada et dans d'autres immeubles de la région de la capitale nationale. Le public cible de ce guide condensé est constitué de gestionnaires de projet travaillant à des projets de réhabilitation d'édifices du patrimoine qui

impliquent l'amélioration du rendement thermique de l'enveloppe d'un édifice patrimonial. Ce guide est un accompagnement condensé du guide technique sur l'isolation de l'intérieur des édifices patrimoniaux en maçonnerie massive : guide des pratiques exemplaires pour atténuer les risques de dommages causés par le gel et le dégel publié par le CNRC en 2022.

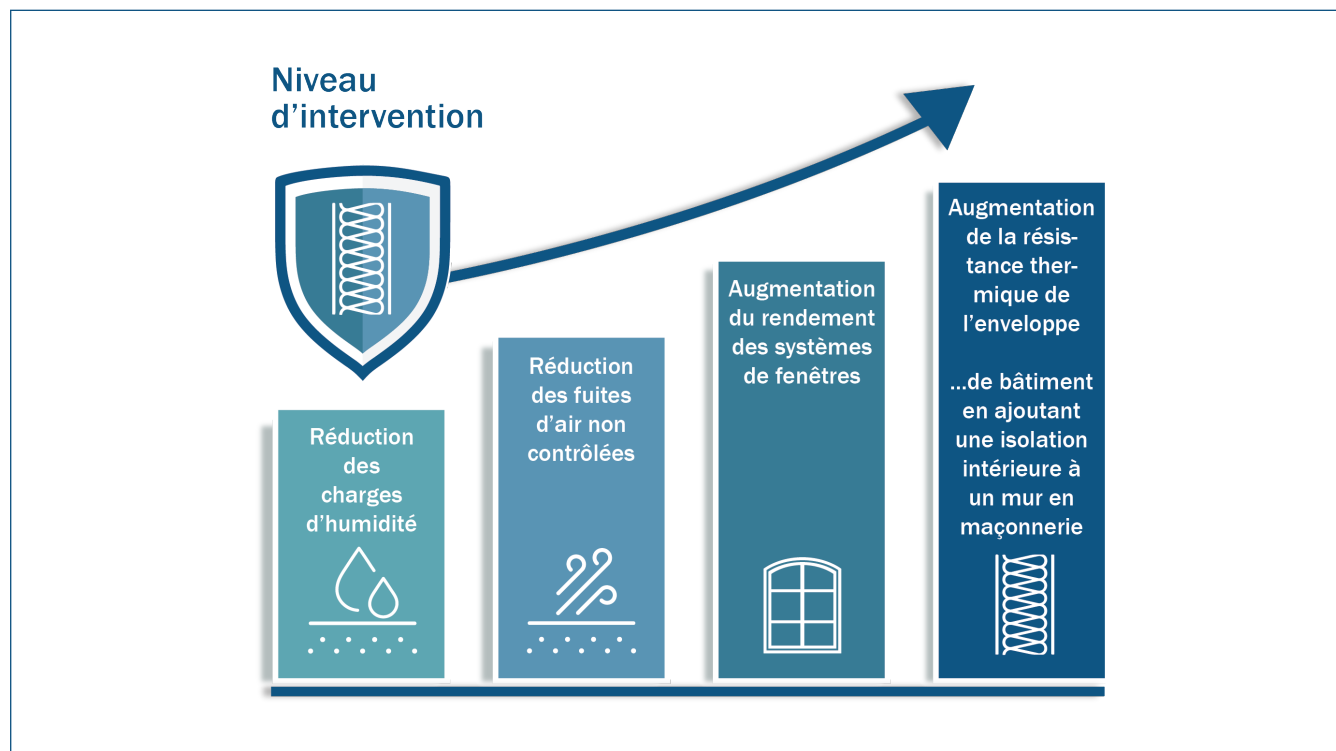
La terminologie importante est définie dans le glossaire à la fin de ce guide, et la première occurrence de chaque terme est en italique dans le texte. Pour une représentation visuelle des défauts courants de l'ensemble du bâtiment, veuillez vous référer au glossaire illustré à la fin du document.



Figure 5 : Une photo de la Tour de la Paix.

APERÇU

Il y a trois améliorations recommandées à envisager avant d'ajouter de l'isolation : réduire les charges d'humidité extérieure, réduire les fuites d'air de l'ensemble de l'immeuble et améliorer les fenêtres.



Ce guide se concentre uniquement sur la dernière étape : l'augmentation de la résistance thermique de l'enveloppe de bâtiment. Il fournit une méthode pour évaluer la possibilité d'augmenter le rendement thermique de l'enveloppe d'un bâtiment en maçonnerie patrimoniale en ajoutant une isolation thermique intérieure. La méthode décrite garantit un risque minimal pour la durabilité à long terme des éléments patrimoniaux extérieurs en maçonnerie et peut généralement être appliquée à toute mise à niveau de l'enveloppe d'un bâtiment en maçonnerie situé dans un climat froid et soumis à des conditions de gel et de dégel. La méthode est décrite dans le graphique ci-dessous.



Augmentation de la résistance thermique de l'enveloppe

... de bâtiment en ajoutant une isolation intérieure à un mur en maçonnerie



ÉTAPE 1 : ÉVALUATION AVANT MISE À NIVEAU

Une évaluation de l'immeuble avant la mise à niveau doit être effectuée pour déterminer l'état et la consommation d'énergie de l'immeuble. Le processus d'inspection avant la mise à niveau est essentiel : il constitue la base de toutes les décisions futures en matière de modélisation et de mise à niveau. Les informations recueillies à partir de l'inspection du site, des essais et des plans de l'immeuble seront utilisées pour le modèle de l'immeuble, qui est abordé à l'étape 3.

L'évaluation avant la mise à niveau est divisée en trois catégories : examen des informations avant inspection, inspections des lieux et essais de rendement sur le site.

EXAMEN DES RENSEIGNEMENTS SUR L'IMMEUBLE AVANT L'INSPECTION

L'objectif de l'examen des renseignements sur l'immeuble avant l'inspection est d'acquérir des renseignements par les dessins et les dossiers historiques sur les géométries de l'immeuble, le rendement passé et les zones à examiner sur place.

- Déterminer la construction de l'enveloppe de bâtiment et les détails de la coupe transversale
 - Déterminer les assemblages de murs extérieurs, de toits, de fondations et de systèmes de fenêtres, y compris les épaisseurs de chaque élément.
 - Déterminer les détails de terminaison et de transition et les coupes transversales aux interfaces dans l'enveloppe de bâtiment.
 - Déterminer la disposition et la géométrie du toit existant. Déterminer le potentiel du drainage du toit en vrac à avoir une incidence sur la construction des murs, fondations et fenêtres. Évaluer lors des inspections du site.

- Déterminer une chronologie de l'histoire des mises à niveau/rénovations
- Déterminer le type et la disposition des fondations de l'immeuble
- Déterminer les types de fenêtres et leur emplacement à l'aide des dessins de l'immeuble
 - Préparer un plan des fenêtres, mis en correspondance avec les dessins d'élévation, à utiliser lors de l'inspection sur place des systèmes de fenêtres.
- Déterminer les systèmes mécaniques existants
- Déterminer les matériaux d'armature types, les directions des portées, les longueurs et l'interface avec les murs extérieurs
- Déterminer l'orientation de l'immeuble
- Déterminer les limitations ou les contraintes potentielles de la mise à niveau en raison de l'utilisation après la réhabilitation ou d'autres facteurs

INSPECTIONS DES LIEUX

Les inspections des lieux permettent de déterminer l'état de l'enveloppe de bâtiment avant la mise à niveau et de déterminer les zones endommagées ou problématiques qui doivent être traitées.

- Mener des entretiens sur place avec les exploitants des immeubles pour recueillir des informations
 - Plaintes des occupants concernant le confort, la température et les courants d'air.
 - Présence d'infiltration d'air ou d'humidité.
 - Présence de condensation à différentes périodes de l'année.

ÉTAPE 1

- Effectuer un examen préliminaire du site
 - Effectuer un examen de la substance désignée afin d'obtenir une compréhension générale de l'immeuble.
 - Planifier l'examen détaillé du site.
- Effectuer un examen détaillé du site
 - Recueillir des informations détaillées sur l'état de l'immeuble.
 - Déterminer les causes de la détérioration de l'enveloppe.
 - Confirmer les assemblages de l'immeuble.
 - Planifier les lieux d'échantillonnage des matériaux.

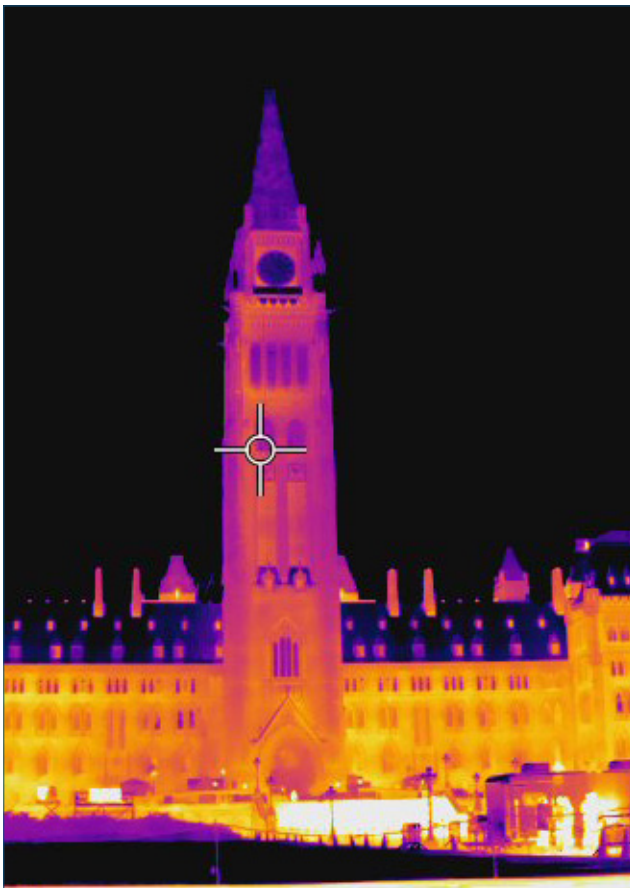


Figure 3 : Balayage thermographique de l'édifice du Centre [2]

ESSAIS DE RENDEMENT SUR LE SITE

Les essais de rendement sur le site fournissent des données qualitatives et quantitatives pour l'élaboration de modèles hygrothermiques et de rendement pour l'ensemble de l'immeuble. Les essais établissent les conditions des murs existants comme base de référence pour un programme de surveillance avant la mise à niveau.

- Surveillance des lieux pour établir les conditions d'exposition et le rendement de l'enveloppe avant la mise à niveau.
 - Créer un plan de collecte des données et un processus de vérification pour fournir des résultats précis;
 - Installer des capteurs de surveillance dans les murs pour établir les conditions avant la mise à niveau;
 - S'assurer que les capteurs du système sont étalonnés et qu'ils sont accompagnés d'un certificat d'étalonnage.
- Essais d'étanchéité à l'air dans l'ensemble de l'immeuble.
- Inspection thermographique de l'enveloppe de bâtiment.
- Récolte d'échantillons de matériaux pour des essais en laboratoire afin d'établir les données de modélisation hygrothermique.
 - Élaborer un plan d'échantillonnage sur le terrain pour déterminer le nombre d'échantillons et les lieux de prélèvement;
 - Consigner minutieusement l'emplacement des échantillons au moyen de photos avant, pendant et après le prélèvement. S'assurer que les emplacements des échantillons sont cartographiés sur un plan d'élevation.



Immeuble du Musée commémoratif Victoria [3]

ÉTAPE 1

ÉTUDE DE CAS

IMMEUBLE DU MUSÉE COMMÉMORATIF VICTORIA

Comment le projet de réhabilitation de l'immeuble du Musée commémoratif Victoria illustre l'étape 1 : évaluation avant la mise à niveau

L'immeuble du Musée commémoratif Victoria étant un musée, ce projet de réhabilitation avait des contraintes de conception très précises pour les conditions intérieures. Il était nécessaire de procéder à une évaluation approfondie avant la mise à niveau afin de concevoir un immeuble offrant les conditions intérieures précises requises pour l'entreposage et l'exposition des objets. Plus précisément, la température intérieure et l'humidité de l'immeuble doivent être surveillées et contrôlées de très près. Une partie de l'évaluation avant la mise à niveau qui a été réalisée comprenait une

analyse des fuites d'air et une thermographie de l'ensemble de l'immeuble. Ces évaluations ont permis d'élaborer le modèle énergétique utilisé dans le processus de conception.

RENSEIGNEMENTS SUR LE BÂTIMENT

Construction originale : 1911

Date de réhabilitation : 2010

Surface de plancher : 23 225 m²

Nombre d'étages : 4

Propriétaire : Musée canadien de la nature

Désignation du patrimoine : Immeuble fédéral du patrimoine classé

ÉTAPE 2 : COLLECTE DES DONNÉES DE GEL ET DE DÉGEL

Les données nécessaires pour terminer la modélisation hygrothermique (analyse gel-dégel de la maçonnerie) sont établies par des essais en laboratoire. Les caractérisations en laboratoire sont utilisées pour déterminer, valider et développer les caractéristiques des matériaux pour les modèles hygrothermiques et énergétiques. La caractérisation des propriétés du matériau consiste en plusieurs essais en laboratoire. En fonction des connaissances préexistantes sur les matériaux de construction, les essais réalisés pour alimenter le modèle peuvent aller des essais préliminaires pour valider les matériaux à une caractérisation complète. Il est recommandé d'effectuer une caractérisation complète, car les éléments particuliers du site et l'âge de l'immeuble peuvent avoir un effet sur les propriétés des matériaux.

À l'avenir, on s'attend à ce que les immeubles en maçonnerie de la région de la capitale nationale subissent une augmentation des cycles de gel et de dégel et des dommages causés par les changements climatiques.



Compte tenu de la variance des propriétés des matériaux patrimoniaux, il est recommandé de réaliser des essais de validation minimaux, même si le matériau a déjà été caractérisé dans d'autres mises à niveau. Les mesures des propriétés matérielles des échantillons de terrain doivent être effectuées dans un laboratoire professionnel capable de mesurer les propriétés hygrothermiques.

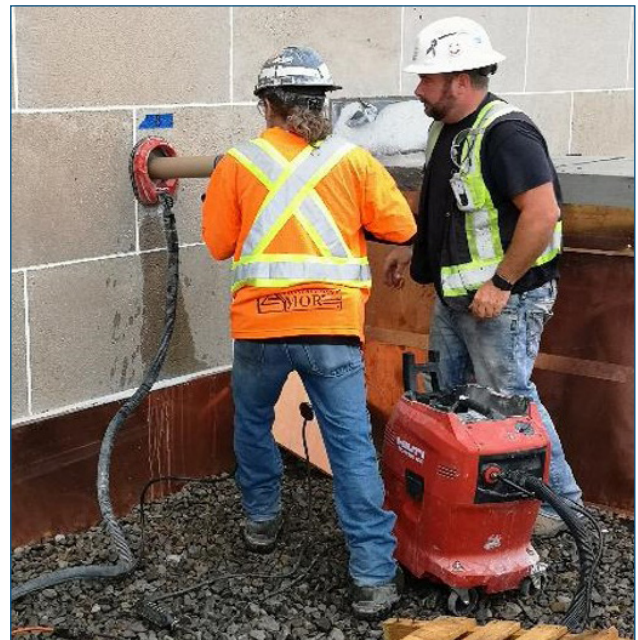


Figure 8 : Échantillonnage de matériaux en cours de réalisation à l'Édifice commémoratif de l'Ouest [4]

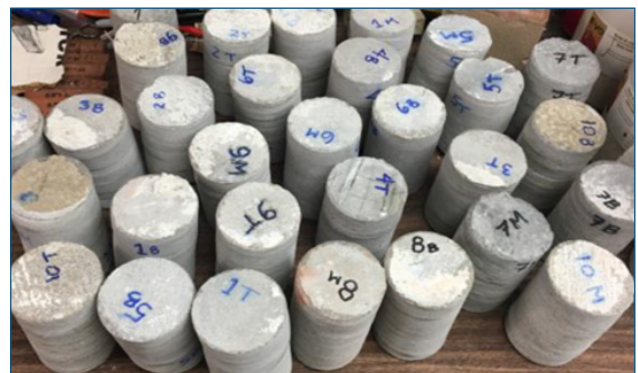


Figure 9 : Échantillons de carottes de matériaux provenant de l'Édifice commémoratif de l'Ouest [4]

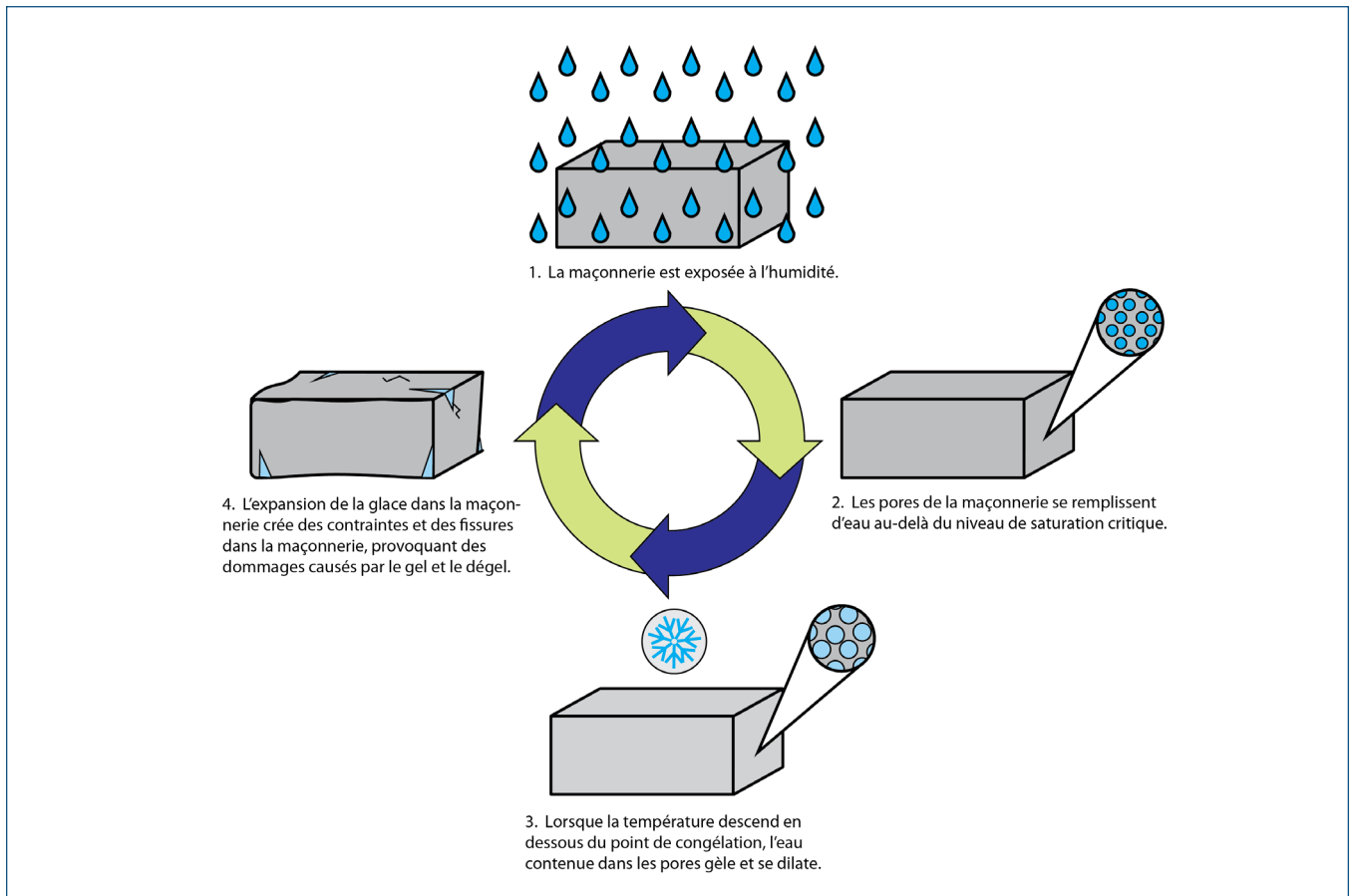


Figure 10 : Le processus d'endommagement par le gel et le dégel

D'autres essais sont nécessaires pour caractériser la durabilité des éléments de maçonnerie au gel et au dégel. Les données de laboratoire nécessaires pour effectuer l'analyse de modélisation de la durabilité par le gel et le dégel sont énumérées ci-dessous :

- Densité apparente sèche (ASTM C20)
- Conductivité thermique (ASTM C518, ASTM C177)
- Capacité thermique (ASTM E1269)
- Coefficient d'absorption d'eau (ASTM C1794)
- Perméabilité (ASTM E96 humide)
- Humidité relative à 80 % de teneur en eau (ASTM C1498)
- Saturation en eau libre (DIN12087)
- Saturation du vide
- Porosité calculée (ASTM C20)
- Saturation critique de gel/dégel (S_{crit})

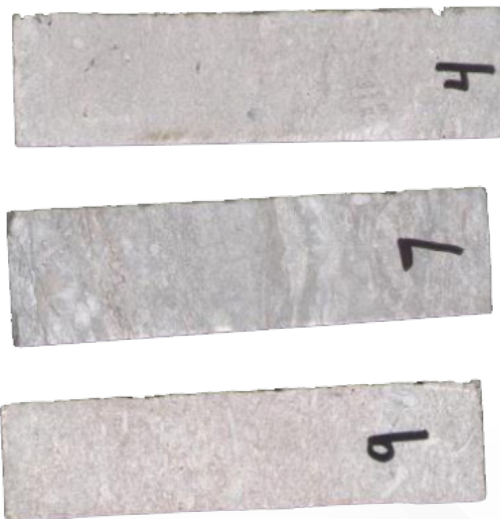


Figure 8 : Échantillons de calcaire pour les essais de laboratoire [4]



Figure 11 : Édifice commémoratif de l'Ouest [5]

ÉTAPE 2

ÉTUDE DE CAS

ÉDIFICE COMMÉMORATIF DE L'OUEST

Comment le projet de réhabilitation de l'Édifice commémoratif de l'Ouest illustre-t-il l'étape 2 : collecte des données de gel et de dégel?

Des échantillons de matériaux et des essais ont été réalisés pour le projet de réhabilitation de l'Édifice commémoratif de l'Ouest afin de créer des modèles hygrothermiques et énergétiques. 30 échantillons de la maçonnerie en pierre calcaire, présentant des conditions d'exposition différentes, ont été prélevés à 10 endroits différents de l'immeuble. Les carottes de pierre ont été envoyées dans un laboratoire où les propriétés de la pierre ont été établies (voir page 17 pour une explication de ces propriétés).

Les données relatives au gel et au dégel ont été utilisées pour déterminer la durabilité du revêtement par une modélisation hygrothermique.

RENSEIGNEMENTS SUR LE BÂTIMENT

Date de réhabilitation : 2024 (projeté)

Surface de plancher : 24 410 m²

Nombre d'étages : 6

Propriétaire : Gouvernement fédéral

Désignation du patrimoine : Immeuble fédéral du patrimoine classé

Échantillon	Perméabilité à la vapeur d'eau ng/Pa·s·m	Valeur A de l'absorption d'eau kg/m ² ·s ^{1/2}	Saturation en eau libre W _f kg/m ³	Saturation critique de gel et de dégel S _{crit} kg/m ³
Pierre 1	3.6	0.001	14	24
Pierre 2	3.9	0.001	24	28
Pierre 3	3.2	0.001	23	25
Pierre 4	4.8	0.001	12	32
Pierre 5	3.8	0.004	46	25
Pierre 6	2.1	0.001	22	32
Pierre 7	3.8	0.001	11	21
Pierre 8	3.8	0.001	18	24
Pierre 9	5.3	0.002	45	48
Pierre 10	3.1	0.002	23	46

Figure 12 : Extrait des propriétés du matériau calcaire de l'Édifice commémoratif de l'Ouest [4]

ÉTAPE 3 : OPTIMISATION DE LA QUANTITÉ D'ISOLATION INTÉRIEURE

Une fois que les informations sur l'immeuble et les propriétés des matériaux ont été établies, une modélisation énergétique et hygrothermique de l'ensemble de l'immeuble peut être réalisée afin de déterminer les effets de l'ajout d'une isolation intérieure sur la durabilité à long terme. Déterminer si, et dans quelle mesure, une isolation intérieure peut être ajoutée est un processus itératif impliquant les deux méthodes de modélisation. Chaque type de modèle informe l'autre jusqu'à ce qu'une conception optimisée pour la mise à niveau thermique de l'enveloppe de bâtiment soit déterminée. Après avoir établi une conception, si certains aspects sont modifiés ou altérés avant ou pendant la construction, les modèles énergétiques et hygrothermiques doivent être mis à jour pour confirmer que les objectifs de la conception seront toujours atteints.

La section suivante détaille les hypothèses et les exigences pour la modélisation de l'ensemble de l'immeuble et la modélisation hygrothermique. Il ne fournit pas suffisamment de contexte pour apprendre à une personne comment achever les modèles.

Il convient de noter que ce guide se concentre sur l'enveloppe de bâtiment. Un modèle énergétique pour l'ensemble de l'immeuble et un modèle hygrothermique prennent en compte d'autres éléments de l'immeuble, ce qui met en évidence l'approche globale de la modélisation. L'amélioration de l'enveloppe d'un bâtiment doit être envisagée dans le cadre de la réhabilitation globale de l'immeuble, car elle interagit avec d'autres décisions touchant la réhabilitation.

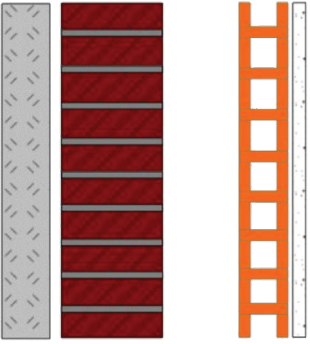
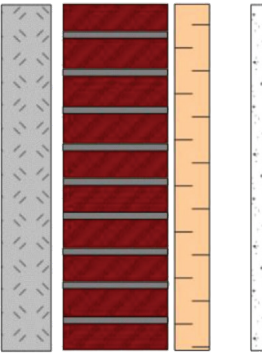
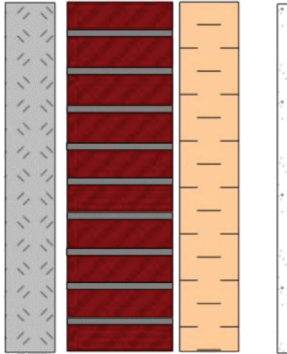
		
Scénario C1	Scénario C2	Scénario C3
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 100 mm de calcaire ▪ 200 mm de brique ▪ 150 mm d'espace d'air ▪ 100 mm de carreau de terre cuite ▪ 15 mm de plâtre 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 100 mm de calcaire ▪ 200 mm de brique ▪ 50 mm de mousse de polyuréthane pulvérisée à cellules fermées de densité moyenne (R-12) ▪ 92 mm de cavité pour les goujons ▪ 13 mm de plaque de plâtre 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 100 mm de calcaire ▪ 200 mm de brique ▪ 100 mm de mousse de polyuréthane pulvérisée à cellules fermées de densité moyenne (R-24) ▪ 92 mm de cavité pour les goujons ▪ 13 mm de plaque de plâtre

Figure 13 : Exemple – Trois scénarios d'amélioration des murs avec différents niveaux d'isolation intérieure à envisager en utilisant l'analyse hygrothermique pour le projet de réhabilitation de l'Édifice commémoratif de l'Ouest [4]

MODÉLISATION ÉNERGÉTIQUE DE L'ENSEMBLE DE L'IMMEUBLE

Dans le contexte particulier des outils de modélisation énergétique de l'enveloppe de bâtiment et de l'ensemble de l'immeuble, il existe deux éléments principaux :

- i. La résistance thermique effective de l'enveloppe de bâtiment;
- ii. Le taux de fuite d'air à travers l'enveloppe.

L'équipe de conception devra calculer la résistance thermique effective propre à la situation de tous les assemblages de l'enveloppe du patrimoine. Le coefficient de transmission thermique effectif est calculé pour l'immeuble avant la mise à niveau et est comparé au coefficient de transmission thermique effectif calculé pour l'immeuble après la mise à niveau. Les ponts thermiques ont un effet plus important sur le coefficient de transmission

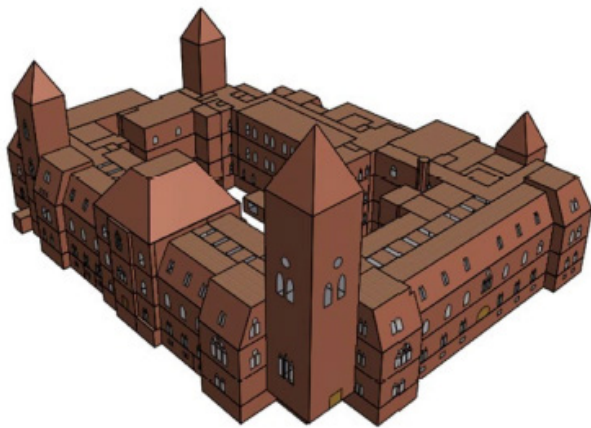


Figure 14 : Modèle 3D de l'édifice de l'Est utilisé pour la calibration du modèle énergétique [6]

thermique effectif lorsqu'un immeuble est isolé par l'intérieur. Un calcul précis de la résistance thermique effective de l'enveloppe, compte tenu de l'ajout supposé d'une isolation intérieure, peut aider à déterminer le moment où le risque de dommages causés par le gel et le dégel devient important.

Le taux de fuite d'air fait référence au transfert convectif de l'air à travers l'enveloppe de bâtiment entre les environnements intérieur et extérieur. Alors que le Code national du bâtiment du Canada prévoit des limites d'étanchéité à l'air pour les nouvelles constructions, il existe peu d'indications sur une valeur réaliste ou réalisable pour les édifices patrimoniaux, que ce soit avant ou après les travaux de mise à niveau. Par conséquent, des valeurs d'essai sont nécessaires pour le projet précis de mise à niveau d'un édifice du patrimoine afin d'élaborer un modèle précis.

La résistance thermique effective fait référence à la résistance thermique globale en tenant compte des ponts thermiques. La résistance thermique effective n'est pas la même que la valeur traditionnelle de la résistance thermique « nominale ». La résistance thermique nominale de l'isolation est une valeur simpliste qui ne doit pas être utilisée comme donnée d'entrée dans une simulation d'immeuble entier, car elle pourrait entraîner une surestimation de la résistance thermique de l'enveloppe.



Les modèles doivent être calibrés par rapport au rendement énergétique (charges de chauffage et de refroidissement, intensité de la consommation d'énergie, etc.) d'un immeuble existant, dans des conditions réelles. Les conditions réelles ne devraient pas différer de manière importante de l'utilisation modélisée.

Les informations nécessaires à une calibration correcte du modèle comprennent :

- Consommation mensuelle de gaz pour une année entière (idéalement plusieurs années pour voir les fluctuations);
- Consommation mensuelle d'électricité pour une année entière (idéalement plusieurs années pour voir les fluctuations).

ÉTABLIR DES CRITÈRES DE RENDEMENT : MÉTHODE DE LA DURABILITÉ AU GEL ET AU DÉGEL

L'intention générale de l'analyse de l'incidence sur la durabilité au gel et au dégel des murs extérieurs est de fournir des informations fondées sur des preuves qui peuvent être utilisées pour évaluer les risques potentiels. Le processus employé suit

la norme *ASTM E3069-19: Standard Guide for Evaluation an Rehabilitation of Mass Masonry Walls for Changes to Thermal and Moisture Properties of the Wall* (ASTM E3069) qui décrit le processus et les étapes clés à suivre pour que les résultats soient cohérents et comparables. La combinaison de l'information source et des résultats des simulations hygrothermiques est utilisée pour juger du risque de gel et de dégel. Il ne suffit pas de réaliser les essais référencés – le concepteur doit démontrer la traçabilité des résultats entre la sortie de la simulation et les preuves empiriques recueillies lors des enquêtes précédentes.

La modélisation hygrothermique comporte trois variables principales : le degré critique de saturation (S_{crit}), la teneur en eau libre à saturation (W_f) et le coefficient d'absorption d'eau (valeur A). Ces facteurs sont décrits plus en détail dans le tableau de la page 16.

Les matériaux dont le W_f est supérieur au S_{crit} peuvent subir des dommages dus au gel et au dégel. Dans ce cas, le matériau peut atteindre une teneur en humidité dans les conditions normales du terrain, ce qui pourrait causer des dommages dans un cycle de gel et de dégel.



Figure 15 : Unité de maçonnerie fissurée en raison de dommages causés par le gel et le dégel [2]

Nom	Propriété matérielle	Pertinence pour la congélation et le dégel
S_{crit}	Degré critique de saturation	Teneur en humidité risquant d'endommager le matériau par l'action du gel et du dégel
W_f	Saturation en eau libre	La teneur en humidité la plus élevée que le matériau est susceptible de connaître dans des conditions de terrain types.
Valeur A	Coefficient d'absorption d'eau	Vitesse à laquelle l'eau liquide peut être absorbée ou évacuée du matériau

En outre, la vitesse à laquelle un élément de maçonnerie absorbera ou désorbera l'humidité (valeur A) permet de prédire si le niveau de saturation dans le matériau est supérieur au niveau de saturation critique (S_{crit}).

Un modèle hygrothermique détermine l'interaction entre ces attributs et prédit le processus en fonction des charges d'humidité locales sur le matériau (pluie poussée par le vent, drainage du matériau au dessus, charges de condensation intérieures, etc.), du potentiel de séchage du matériau, des fluctuations de température locales et de la dépression du point de congélation supposée.

Le nombre de simulations hygrothermiques peut être réduit si les matériaux échantillons ont des valeurs S_{crit} , W_f et A semblables. L'interaction de ces paramètres lors des simulations hygrothermiques régit le nombre de cycles critiques de gel et de dégel. Une justification est requise pour le regroupement des matériaux, y compris une explication de la manière dont la variabilité intergroupe est prise en compte dans les résultats du modèle.

La deuxième étape de l'évaluation du gel et du dégel consiste à établir les critères de risque. L'incertitude de la température de congélation

de l'eau dans un pore doit être déterminée. La température de congélation de l'eau dans les espaces poreux des matériaux poreux varie en fonction de la taille des pores du matériau. Il existe une relation directe : plus la taille des pores diminue, plus le point de congélation de l'eau diminue, généralement jusqu'à des valeurs inférieures à 0 °C. Selon le matériau, il peut y avoir un large éventail de tailles de pores, et l'eau contenue dans ces pores peut geler à des températures différentes.

Une gamme de repères de gel et de dégel doit être envisagée, les seuils de température de gel étant ajustés en fonction de la gamme de tailles de pores prévue pour le matériau. La valeur ou la fourchette du point de congélation doit être soigneusement étudiée et évaluée. Le choix de la température du point de congélation critique doit être fait en fonction de l'expérience, de la connaissance des matériaux et du rendement passé. Des recherches sur la distribution et la gamme de tailles de pores potentielles dans les matériaux sont souvent nécessaires pour soutenir l'hypothèse d'un point de congélation approprié dans les pores de l'échantillon (selon les essais en laboratoire). La température de gel et de dégel supposée doit être documentée et justifiée dans le rapport d'analyse.

ÉTAPE 3

Le nombre de cycles que le matériau peut supporter avant d'être endommagé est déterminé en établissant une limite de base des cycles de gel et de dégel à l'aide des simulations hygrothermiques de l'immeuble existant, avec des résultats corroborés par les enquêtes sur le site. S'il n'y a pas de preuve de dommages causés par le gel et le dégel sur le site, l'analyse de base à l'aide de simulations hygrothermiques indique un seuil de conception. Un seuil peut être utilisé pour évaluer une augmentation potentielle du risque lorsque l'isolation doit être ajoutée.

MODÉLISATION HYGROTHERMIQUE (DURABILITÉ À LONG TERME)

La modélisation hygrothermique utilise les résultats des essais en laboratoire de l'étape 2 pour déterminer les effets de l'isolation intérieure sur la durabilité à long terme de la maçonnerie patrimoniale. Le rendement d'un assemblage en matière de gel et de dégel est basé sur le nombre de cycles critiques de gel et de dégel prédits par

des simulations hygrothermiques transitoires sur une période donnée. Les simulations déterminent un nombre acceptable de cycles que les éléments de maçonnerie peuvent tolérer sans subir de dommages importants, ce qui permet de conclure sur la quantité d'isolation intérieure qui peut être ajoutée en toute sécurité.

Le modèle est créé à l'aide des données recueillies précédemment et validé en comparant les résultats du modèle aux conditions de base de l'immeuble :

- Dresser la liste des matériaux utilisés dans le modèle et les propriétés des matériaux;
- Définir les conditions aux limites extérieures;
- Définir les conditions limites intérieures;
- Configuration de la géométrie de l'enveloppe de bâtiment modèle.

Les résultats de la surveillance avant la mise à niveau peuvent être utilisés pour l'étalonnage, la vérification et la validation du modèle.



Figure 16 : Noyau de mur détérioré avec des dommages causés par le gel et le dégel [2]

ÉTAPE 3

Les conditions environnementales utilisées pour le modèle doivent refléter les conditions antérieures subies par l'enveloppe de bâtiment existant et les conditions futures prévues après la mise à niveau.

Enfin, l'équipe de modélisation doit produire un rapport présentant les résultats et les recommandations de modernisation. Le rapport donne confiance dans la durabilité à long terme, après la réhabilitation, des éléments définissant le caractère du patrimoine. Il garantit que les informations fournies sont suffisantes pour qu'une autre équipe puisse répéter la modélisation.

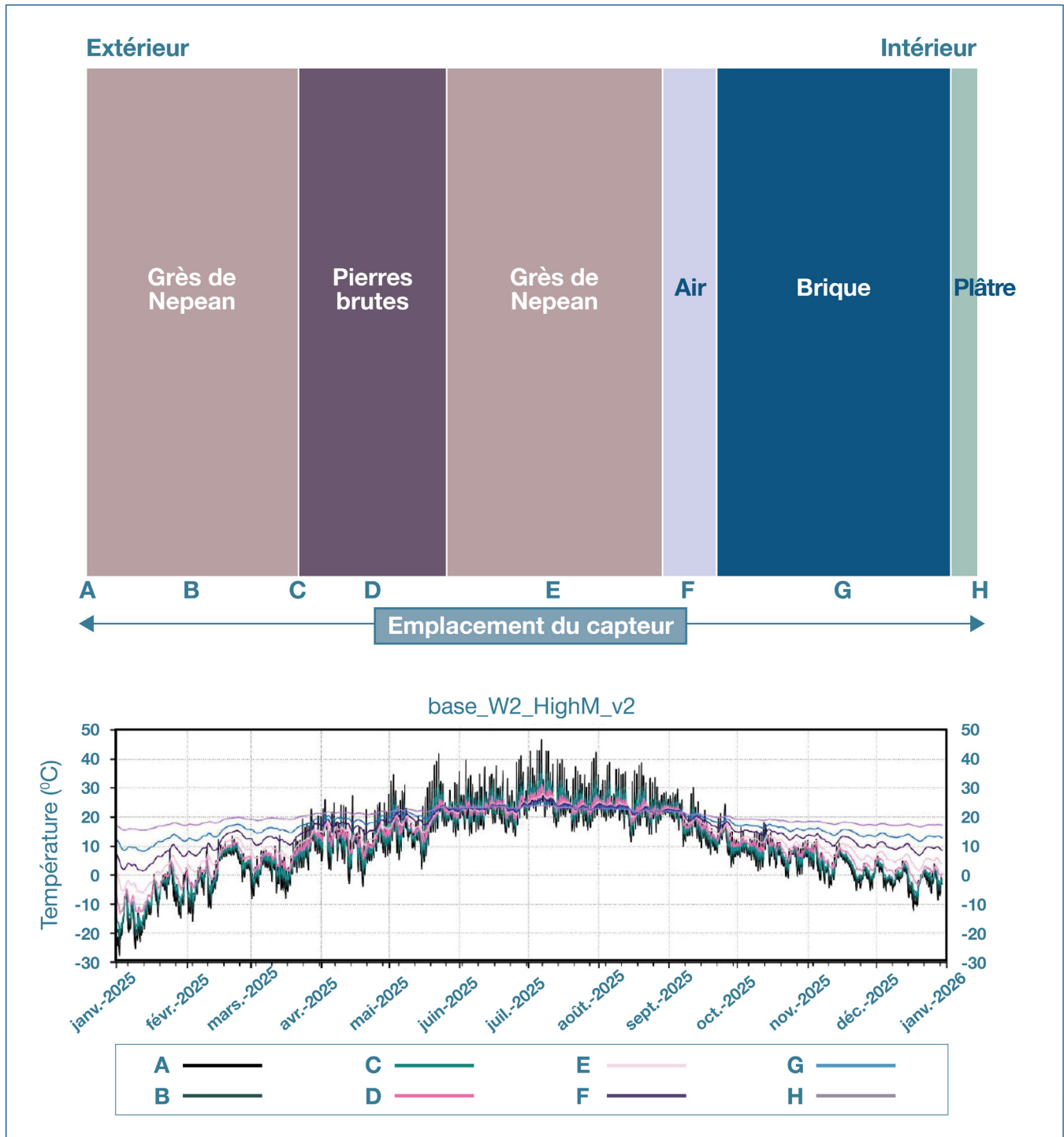


Figure 17 : Exemple de l'emplacement des capteurs muraux dans un modèle hygrothermique de l'édifice de l'Est [6]



Figure 18 : Succursale postale B [2]

ÉTAPE 4

ÉTAPE 4 : MISE À NIVEAU INTÉGRALE

Les informations des étapes 1 à 3 servent de base à la conception du projet. Pendant que les travaux de mise à niveau sont terminés, il est possible que des conditions inconnues de l'immeuble soient révélées. Le cas échéant, l'étape de modélisation doit être révisée pour tenir compte de ces conditions de construction non couvertes afin de garantir que les résultats du projet restent sur la bonne voie. En outre, la phase de construction peut être un moment idéal pour installer les trusses de surveillance sur site comme décrit à l'étape 5.

ÉTUDE DE CAS

SUCCESSALE POSTALE B

Comment le projet de réhabilitation de la succursale postale B illustre-t-il l'étape 4 : mise à niveau intégrale?

Lors de la réhabilitation de la succursale postale B, on a constaté que les grandes surfaces de murs au dessus des plafonds finis n'étaient pas isolées, même si ces surfaces de murs étaient indiquées dans le modèle énergétique comme ayant été isolées. Si l'immeuble n'est pas entièrement compris, les hypothèses formulées dans les modèles énergétiques peuvent être mal

interprétées. Le modèle énergétique a été mis à jour pendant la construction, au fur et à mesure que de nouvelles informations sur l'immeuble étaient acquises.

RENSEIGNEMENTS SUR LE BÂTIMENT

Construction originale : 1939

Dates de réhabilitation : 1975 et 2018

Surface de plancher : 6 040 m²

Nombre d'étages : 8

Propriétaire : Gouvernement fédéral

Désignation du patrimoine : Immeuble fédéral du patrimoine classé

ÉTAPE 5 : PROGRAMME DE SURVEILLANCE APRÈS LA MISE À NIVEAU

Il est recommandé de mettre en place un programme de surveillance des lieux afin de comparer la conception et les résultats réels du point de vue de l'énergie et de la durabilité à long terme. Le programme de surveillance valide les modèles hygrothermiques élaborés pour s'assurer que le rendement continu de l'enveloppe de bâtiment se situe dans la fourchette prévue pendant la phase de conception et confirmer qu'il n'y a pas de risque de dommages causés par le gel et le dégel. Le programme de surveillance après rénovation est très semblable au programme de surveillance avant rénovation – cependant, il peut être plus facile d'installer des capteurs interstitiels dans l'enveloppe pendant la mise à niveau.

Le programme de surveillance continue doit être conçu pour suivre le rendement des emplacements utilisés pour élaborer les modèles hygrothermiques. Le programme se compose de deux étapes simultanées :

1. La collecte de données mesurées sur les conditions hygrothermiques de l'enveloppe de bâtiment;
2. Inspections périodiques du site afin d'évaluer le rendement en cours.

Les écarts par rapport aux prévisions modélisées et tout dommage potentiel doivent être déterminés aussi rapidement que possible, avant que des dommages plus importants ne se produisent. Si la modélisation ne reflète pas le rendement dans le monde réel, des études complémentaires sont nécessaires. Des études complémentaires sont indispensables si les tendances du modèle commencent à indiquer une augmentation des cycles de gel et de dégel par rapport aux hypothèses avant la mise à niveau.

Pour la collecte des données, les capteurs doivent être protégés du rayonnement solaire et être installés à au moins deux endroits :

1. À l'interface air intérieur/mur intérieur;
2. Près des éléments de pierre extérieurs (dans un espace vide, le cas échéant).



Figure 19 : Installation de capteurs de surveillance dans un mur de maçonnerie [2]

ÉTAPE 5

Au minimum, les capteurs doivent détecter la teneur en eau, l'humidité relative et la température. Les capteurs doivent être installés à l'intérieur et à l'extérieur du mur et dans toute l'enveloppe de bâtiment. À chaque endroit du site de mesure, trois capteurs de chaque type doivent être installés pour une fiabilité et une vérification accrues. Les données recueillies par ces capteurs ne sont fiables que si le capteur a été étalonné par rapport à une norme d'étalonnage. L'étalonnage doit avoir lieu chaque année. Les certifications de tous les capteurs et systèmes d'acquisition de données utilisés pour la surveillance doivent être fournies dans le cadre du programme.

Les données recueillies doivent être utilisées pour mettre à jour le modèle énergétique de l'immeuble entier et le modèle hygrothermique afin de refléter la conception finale comme elle a été réalisée. Le modèle actualisé doit être comparé aux données recueillies dans le cadre du programme de surveillance continue. La meilleure pratique consiste à mettre en place un programme de surveillance pendant au moins trois ans après la réhabilitation, afin de permettre à l'immeuble de retrouver un rendement normal.

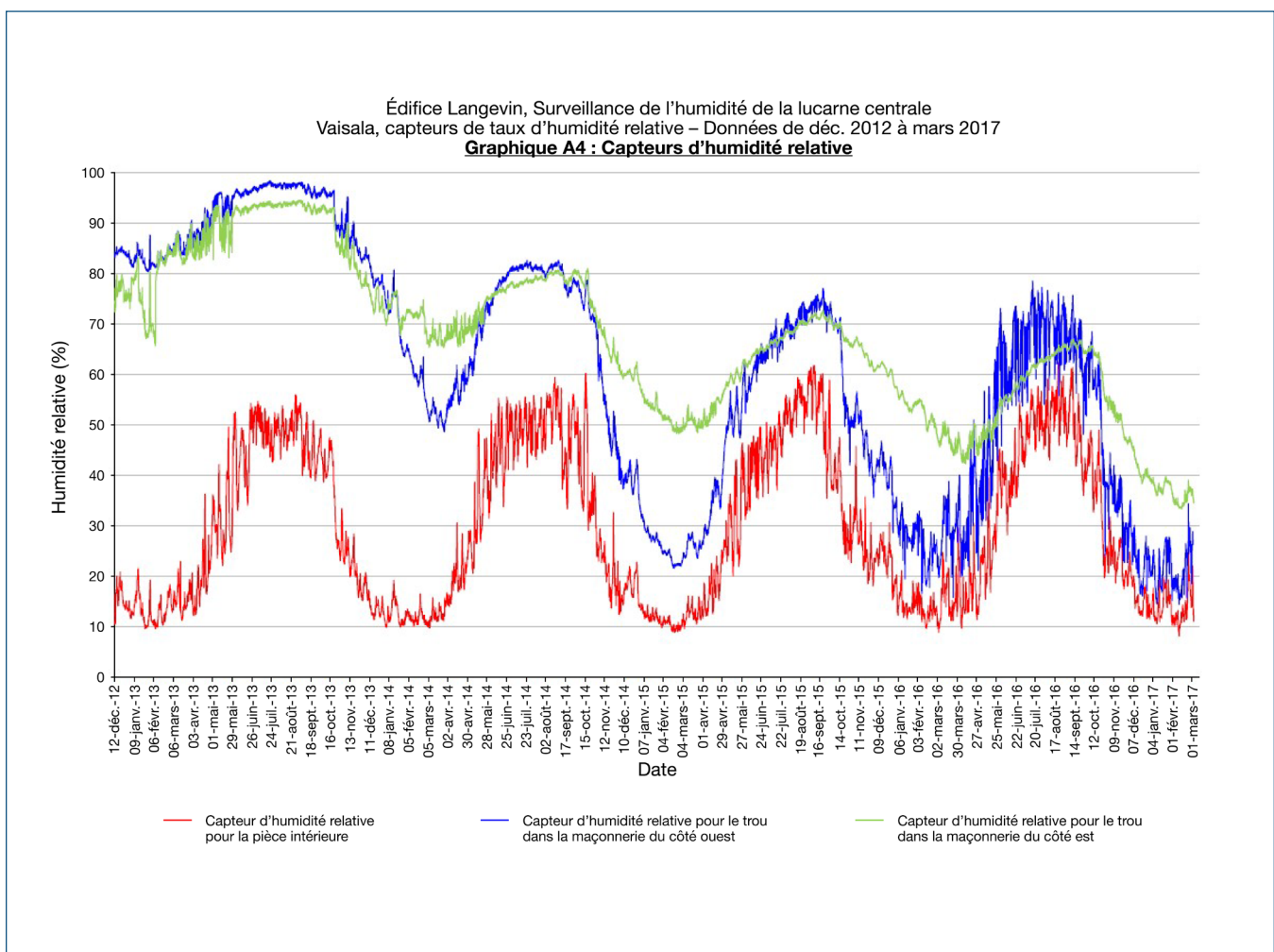


Figure 20 : Graphique de contrôle des capteurs d'humidité relative au 80, rue Wellington, anciennement connu sous le nom d'édifice Langevin [7]



Figure 21 : Centre mondial du pluralisme [8]

GLOBAL CENTRE FOR PLURALISM

ÉTAPE 5

ÉTUDE DE CAS

CENTRE MONDIAL DU PLURALISME

Comment le projet de réhabilitation du Centre mondial du pluralisme illustre l'étape 5 : programme de suivi après la mise à niveau

L'intervention de conception au Centre mondial du pluralisme a nécessité une évaluation rigoureuse des risques et des avantages – essais de matériaux, modélisation hygrothermique et analyse informatique – en vue de son approbation par le Bureau d'examen des édifices fédéraux du patrimoine. Le projet a intégré un programme de contrôle hygrothermique d'après-coup et de corrosion d'une durée de trois ans. La maçonnerie a été contrôlée en huit endroits de l'immeuble, y compris les assemblages de murs isolés et non isolés. La température et l'humidité relative ont été suivies à ces endroits. Chaque année, les données ont été compilées et des recommandations

ont été formulées concernant l'état de la pierre et les réparations ou ajustements suggérés. Le programme a indiqué que l'introduction de l'isolation n'a pas augmenté le risque pour la durabilité des immeubles à ce jour.

RENSEIGNEMENTS SUR LE BÂTIMENT

Construction originale : 1865

Date de réhabilitation : 2019

Surface de plancher : 28 400 m²

Nombre d'étages : 4

Propriétaire : Gouvernement fédéral

Désignation du patrimoine : Immeuble fédéral du patrimoine classé

CONCLUSION ET POSSIBILITÉS FUTURES

Ce guide condensé propose une approche pour améliorer le rendement thermique des enveloppes des édifices patrimoniaux en déterminant la quantité d'isolation qui peut être ajoutée à l'intérieur d'un immeuble tout en réduisant le risque de dommages causés par le gel et le dégel à la maçonnerie extérieure. Cette approche permet d'optimiser l'efficacité énergétique de l'immeuble pour atteindre les objectifs de durabilité tout en protégeant les éléments caractéristiques du patrimoine.

Ce guide condensé des pratiques exemplaires s'appuie sur des analyses documentaires, des normes, des études de cas, des recherches et des consultations du secteur privé. La réhabilitation d'un édifice patrimonial doit suivre une approche globale dans laquelle les améliorations et les réparations de tous les composants et systèmes de l'immeuble doivent être évaluées simultanément. Ce guide est un outil à utiliser dans le cadre d'un plan global de réhabilitation et ne doit pas être utilisé indépendamment des autres considérations relatives à la réhabilitation.

La méthode proposée utilise les évaluations sur le site, l'échantillonnage sur le terrain et la caractérisation des propriétés des matériaux pour produire des résultats au stade de la modélisation, de sorte que le risque de gel et de dégel puisse être établi. L'analyse de modélisation dicte la quantité d'isolation à ajouter à l'intérieur du mur patrimonial.

Pour une discussion plus approfondie des sujets abordés dans le présent document, veuillez consulter le guide du CNRC sur l'isolation de l'intérieur des édifices patrimoniaux en maçonnerie massive : guide des pratiques exemplaires pour atténuer les risques de dommages causés par le gel et le dégel dans les projets de réhabilitation patrimoniale.

Au cours de l'élaboration de ce guide des pratiques exemplaires, plusieurs possibilités de développement futur ont été révélées pour aider à la réhabilitation thermique des enveloppes du patrimoine.

La trousse comporte ce qui suit :

- i. Étanchéité à l'air des immeubles du patrimoine;
- ii. Analyse avancée de la pluie poussée par le vent à l'aide de la dynamique des fluides numérique;
- iii. Balayage laser 3D lorsque les plans de l'immeuble ne sont pas disponibles.

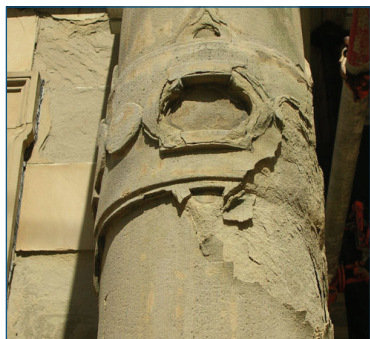


Figure 22 : Modèle d'information sur l'édifice du Centre créé à partir du balayage laser [9]

GLOSSAIRE

Fuite d'air	Le transfert incontrôlé d'air à travers l'enveloppe de bâtiment.
Enveloppe de bâtiment	L'ensemble des couches qui protègent l'espace intérieur d'un bâtiment contre les éléments climatiques extérieurs. Également appelé l'« enceinte de l'immeuble ».
Éléments caractéristiques	Matériaux, formes, emplacement, configurations spatiales, usages et connotations ou significations culturelles qui contribuent à la valeur patrimoniale d'un lieu historique et qu'il faut protéger pour préserver cette valeur patrimoniale.
Conservation	Toutes les mesures ou tous les processus qui visent à sauvegarder les éléments caractéristiques d'un lieu patrimonial afin de conserver sa valeur patrimoniale et de prolonger sa vie physique.
Cycle critique de gel et de dégel	Un cycle de gel et de dégel dans lequel la saturation en humidité dans le pore est supérieure au niveau de saturation critique. Voir saturation critique.
Saturation critique	Niveau de saturation dans lequel l'eau interstitielle gelée et l'expansion volumique correspondante due à la formation de cristaux de glace dépassent la résistance à la traction ultime du matériau de maçonnerie.
Résistance thermique effective	La résistance thermique qui tient compte de tous les ponts thermiques à travers la couche d'isolation de l'enveloppe de bâtiment. Voir « pont thermique ».
Échantillonnage sur le terrain	Le fait de prélever des échantillons de matériaux dans l'immeuble pour les caractériser en laboratoire, y compris pour l'analyse des substances désignées et l'enlèvement des matériaux sur place.
Dépression du point de congélation	Phénomènes qui se produisent dans les milieux poreux où le point de congélation de l'eau dépend du diamètre des pores et diminue avec la diminution du rayon des pores, dans certains cas bien en dessous de 0 °C.
Cycle gel-dégel	Cycle au cours duquel la température d'un matériau poreux passe d'un niveau supérieur à un niveau inférieur à la température du point de congélation, ce qui indique la formation probable de glace dans les pores.
Modèle hygrothermique	Un modèle qui simule le transfert de chaleur et d'humidité à travers les éléments de l'immeuble. Dans le cas où les phénomènes de transport d'air sont inclus, on parle généralement de modèle de chaleur, d'air et d'humidité.
Réhabilitation	L'adaptation réfléchie d'un lieu patrimonial ou d'une de ses composantes afin d'en faire une utilisation continue ou une nouvelle utilisation contemporaine et compatible avec le lieu, tout en protégeant la valeur patrimoniale.
Mise à niveau	Une partie précise du processus de réhabilitation, notamment une modification visant à améliorer le rendement d'un système ou d'un composant au-delà de la conception originale.
Pont thermique	Un pont thermique se produit lorsqu'un matériau présentant une conductivité thermique relative supérieure (ou une résistance thermique inférieure) dissèque un matériau présentant une conductivité thermique relative inférieure (ou une résistance thermique supérieure) dans une direction parallèle à la direction du transfert thermique.

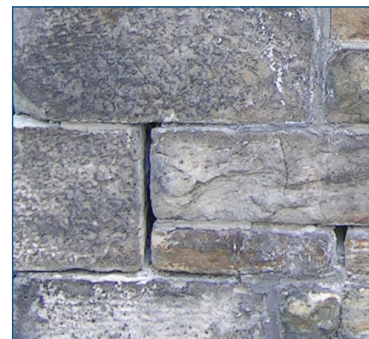
GLOSSAIRE VISUEL



Mise à l'échelle des contours [2]



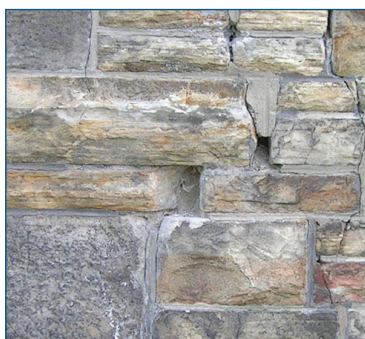
Mortier décollé [2]



Unité de maçonnerie déliée [2]



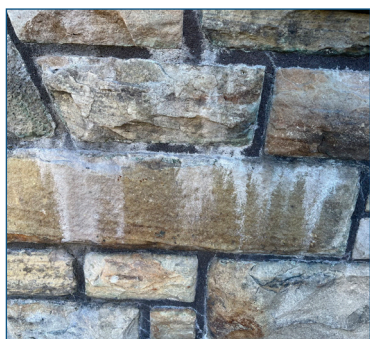
Délamination [2]



Détachement [2]



Mortier détérioré [2]



Efflorescence



Échec de l'orientation en face [2]



Domages causés par le feu



Surface friable [2]



Joint de maçonnerie ouvert [2]



Éclat [2]

RÉFÉRENCE DES SCHÉMAS

- [1] Services publics et Approvisionnement Canada, gouvernement du Canada, *Galerie de photos de l'édifice de l'Ouest*, 6 novembre 2018. <https://www.tpsgc-pwgsc.gc.ca/citeparlementaire-parliamentaryprecinct/rehabilitation/ouestgalerie-westgallery-fra.html>
- [2] Services publics et Approvisionnement Canada – Services de conservation du patrimoine
- [3] Attractions Ontario, *Musée canadien de la nature*. <https://attractionsontario.ca/attraction-listings/canadian-museum-of-nature/>
- [4] Morrison Hershfield, *Analyse du cycle gel-dégel et analyse thermique de la réhabilitation du mur de l'Édifice commémoratif de l'Ouest*, janvier 2019.
- [5] Services publics et Approvisionnement Canada, gouvernement du Canada, *Édifice commémoratif de l'Ouest : Réhabilitation*, 14 août 2017. <https://www.tpsgc-pwgsc.gc.ca/biens-property/construction/eco-wmb-fra.html>
- [6] Stantec et SHRMA, *Étude de faisabilité technique de l'édifice de l'Est – Étape 2*, février 2022.
- [7] R. Melanson et SPAC, Services de conservation du patrimoine, *Installation de capteurs d'humidité et d'humidité relative*.
- [8] R. Melanson, *édifice Langevin Ottawa (Ontario), Surveillance environnementale de la lucarne centrale 2016-2017*, SPAC, Services de conservation du patrimoine, mars 2017.
- [9] Journées des lieux patrimoniaux, *Centre Mondial du Pluralisme*. <https://historicplacesdays.ca/fr/lieux/centre-mondial-du-pluralisme/>
- [10] Exemples CENTRUS, BIM et numérisation de la présentation ASHRAE sur la réhabilitation de l'édifice du Centre.

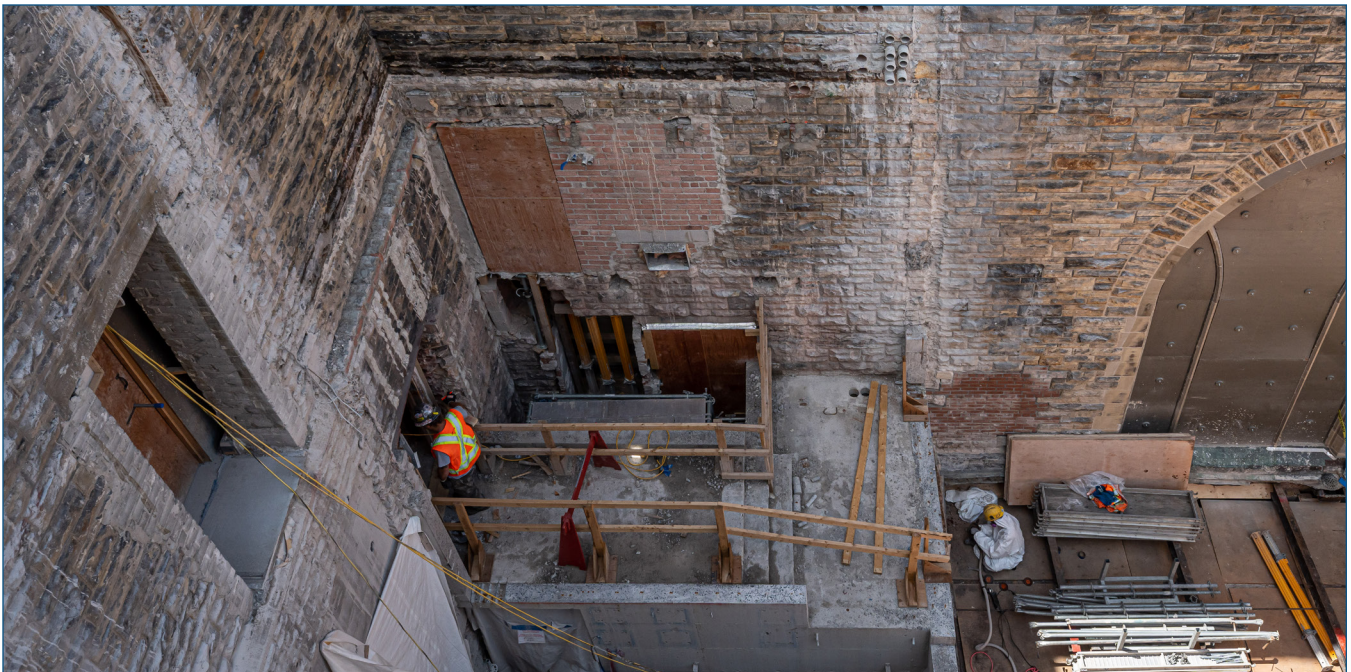


Figure 23 : Maçons au site d'excavation à l'édifice du Centre