



Institute for Catastrophic
Loss Reduction
Building resilient communities

Institut de prévention
des sinistres catastrophiques
Bâtir des communautés résilientes

La conception résistante aux vents violents pour les nouvelles habitations à ossature de bois a un rapport moyen coûts-avantages de 6 pour 1 au Canada

Par Keith Porter, ingénieur en chef de l'IPSC

Décembre 2023



La conception résistante aux vents violents pour les nouvelles habitations à ossature de bois a un rapport moyen coûts-avantages de 6 pour 1 au Canada

Par Keith Porter, ingénieur en chef de l'IPSC

Décembre 2023

Série de documents de recherche IPSC – numéro 74

Publié par :

Institut de prévention des sinistres catastrophiques
30-34 Duncan Street
Toronto (Ontario) Canada M5V 2C3

Ce matériel peut être copié à des fins liées au document aussi longtemps que les auteurs et les détenteurs de droits sont reconnus.

Les opinions exprimées dans cet article sont celles des auteurs et pas nécessairement celles de l'Institut de prévention des sinistres catastrophiques.

Couverture : (à gauche) Dan Sandink, 2023, vis de ferme sur un chantier Doug Tarry à St. Thomas, Ontario; (à droite) dommages causés par une tornade EF-2 à Angus, Ontario, en juin 2014 (Crédit image : Chris So, Toronto Star. Droit d'utilisation revendiqué en vertu de l'article 29 de la Loi sur le droit d'auteur du Canada, relatif à l'utilisation équitable). Couverture arrière : (à gauche) Tornade à Vaughan en août 2009; (à droite) Dommages causés par la tornade EF-2 à Barrie, Ontario, en juillet 2018 (Crédit image : Christopher Katsarov, Presse canadienne. Droit d'utilisation revendiqué en vertu de l'article 29 de la Loi sur le droit d'auteur du Canada, relatif à l'utilisation équitable).

ISBN: 978-1-927929-42-1

Copyright © 2023 Institut de prévention des sinistres catastrophiques

Créé en 1997 par les agents en assurance de dommages du Canada, l'**Institut de prévention des sinistres catastrophiques** (IPSC) est un institut de recherche indépendant à but non lucratif basé à Toronto et à l'Université Western de London, au Canada. L'Institut est un membre fondateur de Global Alliance of Disaster Research Institutes. Le personnel de recherche de l'Institut est reconnu sur la scène internationale pour ses travaux précurseurs dans un certain nombre de domaines. La recherche multidisciplinaire est à la base du travail de l'Institut qui vise à renforcer la résilience des communautés face aux catastrophes.



L'IPSC a été désigné Centre international d'excellence de l'Integrated Research on Disaster Risk (IRDR).

Les Centres internationaux d'excellence (ICoE) de l'IRDR créés par le comité scientifique de l'IRDR et les

comités nationaux de l'IRDR, sont des centres d'excellence internationaux de l'IRDR. Les programmes de recherche des centres d'excellence incarnent une approche intégrée de la réduction des risques de catastrophe. Les programmes de recherche de l'ICoE incarnent une approche intégrée de la réduction des risques de catastrophe qui contribue directement au plan scientifique de l'ICSU/IRDR pour la recherche intégrée sur les risques de catastrophe et à ses objectifs, ainsi qu'au plan stratégique de l'IRDR (2013-2017).

Remerciements

Le Conseil canadien des normes a financé ce travail. Dan Sandink a coordonné la recherche dans le cadre d'un projet plus vaste, notamment en convoquant un groupe d'intervenants experts pour fournir des conseils et un examen collégial. Ce groupe est composé de Marianne Armstrong, Bas Baskaran, Josh Bautista, Brent Bunting, Vince Carrier, Stefanie Coleman, Mohamed El Semelawy, Gary Graham, Reza Hessabi, Michael Janotta, Robert Jonkman, Cengiz Kahramanoglu, Gregory Kopp, Frank Lohmann, Mansoor Mahmood, David Potter, Kevin Rocchi, Flonja Shyti, Jitender Singh, Sarah Stevenson et Jamie Yolkowskie. Je tiens à remercier chaleureusement tous ces contributeurs.

Citation recommandée

Porter, K.A. (2023) *High-wind design of new woodframe houses has an average benefit-cost ratio of 6:1 in Canada (La conception résistante aux vents violents pour les nouvelles habitations à ossature de bois a un rapport moyen coûts-avantages de 6 pour 1 au Canada)*. Institut de prévention des sinistres catastrophiques, Toronto, ON, 36 p.

Résumé

Nous pouvons concevoir de nouvelles maisons à ossature de bois pour résister aux vents violents; mais à quel prix et pour quels avantages? Ce travail prend en compte les principales améliorations de la transmission des charges verticales pour résister au soulèvement du vent dans la norme canadienne CSA S520:22 qui dépassent les exigences du Code national du bâtiment de 2020. Il présente une méthode analytique d'ingénierie éolienne probabiliste et basée sur les performances qui traite la vitesse du vent et la fragilité des composants comme des facteurs incertains, et la géométrie, la masse et le coût des réparations comme des facteurs déterministes. J'ai appliqué la méthode à un seul cas d'essai : une maison de deux étages, de 2 180 pieds², avec des toits à pignon et des toits en croupe. Les caractéristiques ajoutent environ 1 % au coût de construction (1,70 \$/pied² ou 3 600 \$). En tenant compte du risque de vent linéaire et de tornade et en calculant la moyenne de la population canadienne, elles permettent d'éviter 22 000 dollars de pertes futures, soit un rapport moyen coûts-avantages pondéré de 6 pour 1, variant entre 0,1 et plus de 100 pour 1 en fonction de l'emplacement. Elles réduisent la fréquence moyenne pondérée des dommages importants d'environ 0,02 par an à près de zéro, et la gravité des dommages de 17 000 à 6 000 dollars. Les données relatives à la fréquence des sinistres et à leur gravité concordent généralement.

Figure A-1. Carte du rapport coûts-avantages

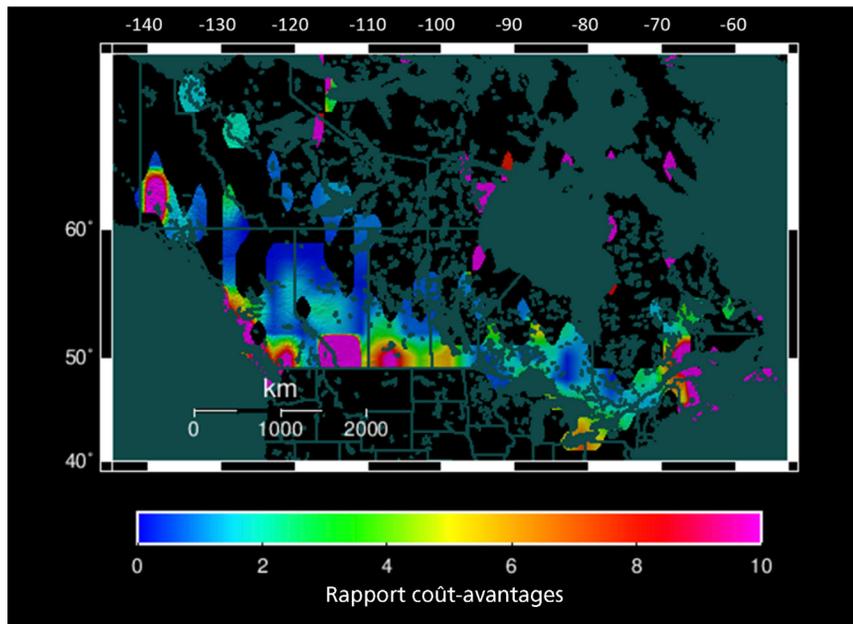


Table des matières

Remerciements	i
Résumé	ii
Liste des figures	iv
Liste des tableaux	v
1. Introduction	1
1.1 Motivation	1
1.2 Objectifs et portée	1
1.3 Organization du rapport	1
2. Revue de la littérature	2
2.1 Approches de l'analyse coûts-avantages	2
2.2 Renseignements sur les biens	3
2.3 Renseignements sur les risques	3
2.4 Renseignements structurels	4
2.5 Renseignements sur les dommages	4
2.6 Renseignements sur les pertes	5
3. Méthodes proposées	6
3.1 Analyse des biens	6
3.2 Analyse des risques	6
3.3 Analyse structurels	8
3.4 Analyse des dommages	9
3.5 Analyse des pertes	9
4. Constatations	11
4.1 Actif	11
4.2 Risques	13
4.3 Charges	15
4.4 Dommages	15
4.5 Perte	16
4.6 Résultats	16
4.7 Études de sensibilité	18
5. Conclusions	19
6. Références citées	20
Annexe A. Essais d'assemblage toit-mur	23
A.1 Spécimens d'essai	23
A.2 Appareil d'essai	23
A.3 Protocole de chargement	24
A.4 Analyse des résultats	24
A.5 Résultats	24

Liste des figures

Figure 1.	Éléments communs d’une analyse probabiliste des risques d’ingénierie axée sur les performances.	2
Figure 2.	Trajectoire d’une tornade en forme de lentille (Sills et coll. 2020)	3
Figure 3.	Estimation de la surface de la trajectoire de la tornade à partir de la longueur et de la largeur de la trajectoire	8
Figure 4.	Vue d’ensemble du bâtiment examiné ici. (A) Élévation avant, et (B) Plan du plancher principal	11
Figure 5.	Sources du coût de 3 600 \$ des éléments de la transmission des charges verticales, y compris le matériel, la main-d’œuvre, l’équipement, les frais généraux et les bénéfices.	12
Figure 6.	Taux d’occurrence des tornades λ basé sur les données du Northern Tornado Project	14
Figure 7.	Répartition de la taille des tornades au Canada.	14
Figure 8.	Fonction du coefficient de risque de tornade $C(q)$ pour une période de 3 secondes q	14
Figure 9.	Risque lié au vent à London, Ontario	14
Figure 10.	Fonctions de vulnérabilité pour les conditions actuelles et les conditions hypothétiques	17
Figure 11.	Carte du rapport coûts-avantages.	17
Figure 12.	Diagramme des résultats de l’étude de sensibilité lors d’une tornade	18
Figure 13.	Appareil de test	23
Figure 14.	Spécimen d’essai (A) à clous en biais seulement, et (B) un échantillon avec une vis de ferme, après l’essai.	23
Figure 15.	Capacité d’assemblage entre le toit et le mur (A) assemblage par clouage en biais, (B) idem plus une vis de ferme de 6 pouces	25

Liste des tableaux

Tableau 1.	Fonction de masse de probabilité de la pression locale du vent q donnée par l'échelle Fujita améliorée (d'après Ramdsdell et coll. 2007)	8
Tableau 2.	Coûts pour se conformer aux éléments de charge verticale et latérale de la norme CSA S520:22	12
Tableau 3.	Estimation de la surface moyenne de la voie ferrée en fonction de l'indice EF	14
Tableau 4.	Répartition de la pression du vent par indice EF	14
Tableau 5.	Charges permanentes sur les assemblages des murs périmétriques.	15
Tableau 6.	Capacités des composants utilisés ici	15
Tableau 7.	Coûts unitaires de réparation	16
Tableau 8.	Résumé des résultats moyens pondérés en fonction de la population	17
Tableau 9.	Données de l'étude de sensibilité déterministe	18
Tableau 10.	Essais de traction de l'assemblage toit-mur.	24
Tableau 11.	Résumé des résultats	24

1. Introduction

1.1 Motivation

La crise climatique révèle la vulnérabilité des bâtiments canadiens aux vents violents. Les tempêtes de vent violentes sont de plus en plus fréquentes et les pertes de plus en plus importantes. D'importantes tornades ont frappé Ottawa et Gatineau en septembre 2018 ainsi que Barrie en juillet 2021, entraînant des sinistres assurés de 344 millions de dollars et 107 millions de dollars, respectivement. Pour sa part, le derecho qui s'est étendu au sud de l'Ontario et au Québec a coûté environ 875 millions de dollars pour des sinistres assurés. Au total, sur les 139 événements enregistrés entre 2009 et 2022 ayant fait l'objet de réclamations, 111 (80 %) comportaient des pertes dues au vent. La conception présentement en vigueur semble donc insuffisante, ce qui soulève une question importante : nous pouvons concevoir de nouvelles maisons à ossature de bois pour qu'elles soient beaucoup plus résistantes que ne l'exige le code du bâtiment, mais à quel prix? Est-ce que les avantages dépasseraient le coût?

Le Conseil canadien des normes a parrainé les présents travaux afin de vérifier l'hypothèse selon laquelle une meilleure protection des bâtiments de la partie 9, neufs ou rénovés, grâce à des normes liées au vent récemment élaborées, permettrait de réaliser plus d'économies que de dépenses, ce qui rendrait ainsi les bâtiments moins coûteux à long terme. Les travaux comprennent deux études parallèles : (A) une analyse coûts-avantages et (B) une étude des obstacles et des possibilités liés à l'adoption de normes et de lignes directrices pour une protection élevée contre le vent. Le présent rapport communique l'analyse coûts-avantages.

1.2 Objectifs et portée

Examinons les coûts et les avantages des principales améliorations apportées à une norme canadienne, la norme CSA S520:22. Cette norme propose diverses améliorations de la capacité de transmission des charges verticales et latérales des petits bâtiments à ossature bois. Le présent document vise à estimer les coûts, les avantages et le rapport coûts-avantages des principaux aspects de la norme relatifs à la transmission des charges verticales. Il élabore et applique une nouvelle méthode d'ingénierie axée sur le rendement. Il ne tient pas compte des caractéristiques liées à la transmission des charges latérales, des problèmes d'inspection et des défauts de construction.

Une note technique parallèle traite des défis et des possibilités associés à la mise en œuvre des directives de réduction des risques liés aux vents violents pour les bâtiments. Elle examine les facteurs qui entravent ou favorisent l'adoption de méthodes de protection contre les vents violents pour les bâtiments de la partie 9, et formule des recommandations pour améliorer l'adoption des dispositions relatives à la protection contre les vents violents.

1.3 Organisation du rapport

Ce chapitre présente la motivation et la portée de l'étude. Le chapitre 2 passe en revue une grande partie de la littérature pertinente. Le chapitre 3 décrit les méthodes proposées. Le chapitre 4 présente les constatations. Le chapitre 5 tire de brèves conclusions. Le chapitre 6 présente une liste des références citées.

2. Revue de la littérature

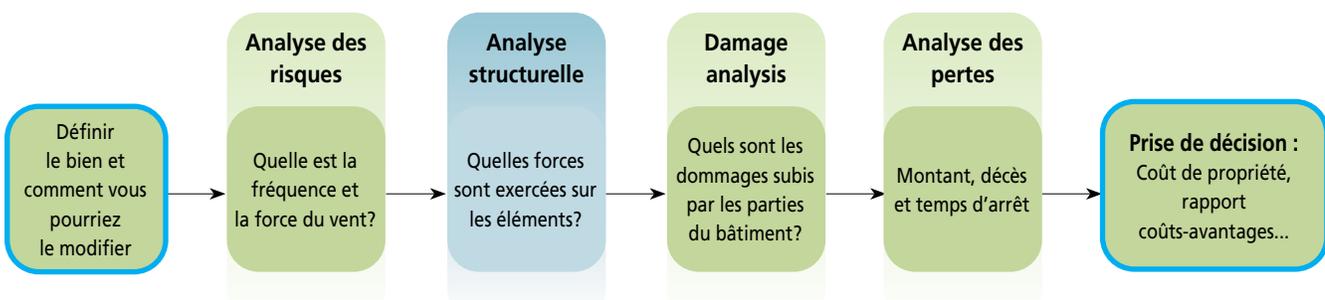
Ce chapitre passe en revue la littérature pertinente sur six sujets : les approches de l'analyse coûts-avantages, les renseignements sur les maisons canadiennes exposées aux dommages causés par les tornades, les dangers liés au vent au Canada, les attributs structurels des maisons canadiennes, l'endommagement des composants des maisons et les sinistres conditionnés par les dommages.

2.1 Approches de l'analyse coûts-avantages

Les modèles commerciaux de risque de catastrophe tels que le RMS Commercial Hurricane Model (par exemple, Risk Management Solutions 2012) ont tendance à s'appuyer sur des modèles empiriques de mesures de pertes financières et autres en fonction de l'excitation environnementale (par exemple, la vitesse du vent, la pression, etc.) pour des catégories de bâtiments. Ils élaborent ces fonctions, dites de vulnérabilité à partir d'une analyse de régression des données de sinistres d'ouragans passés. Les modèles empiriques de vulnérabilité s'appliquent toujours à des groupes de biens.

Les approches fondées sur les performances (par exemple, Porter et coll. 2001, Vickery et coll. 2006) reposent généralement sur un modèle prévisionnel dans lequel on sélectionne une conception réelle ou hypothétique d'un seul actif et on applique une série d'analyses illustrées dans la Figure 1. L'analyse des dangers caractérise l'excitation environnementale future incertaine sur l'actif, l'analyse structurelle estime les forces et les déformations des membres en fonction de l'excitation environnementale, l'analyse des dommages estime les dommages probabilistes à chaque composant structurel et non structurel en fonction de la réponse structurelle, et l'analyse des pertes estime les pertes financières et autres pertes incertaines en fonction des dommages. On applique le théorème de la probabilité totale pour propager les incertitudes et calculer les valeurs attendues et les moments supérieurs de la perte. Dans le cadre d'une recherche appliquée pour la Federal Emergency Management Agency, l'Applied Technology Council (2012) a normalisé une telle méthode pour l'analyse des risques sismiques, mais aucune norme de ce type ne semble exister pour le vent.

Figure 1. Éléments communs d'une analyse probabiliste des risques d'ingénierie axée sur les performances



Porter et Cho (2013) montrent comment appliquer une approche basée sur la performance à des groupes de bâtiments particuliers pour estimer le comportement d'une classe plus large à laquelle ils appartiennent. On sélectionne les attributs qui semblent avoir le plus d'importance pour le comportement de la classe et on recueille des observations sur ces attributs à partir d'un échantillon que l'on pense représentatif de la classe. On modélise ensuite un actif avec quelque chose comme les valeurs moyennes de chaque attribut important. Pour un échantillon plus riche, on modélise également des paires d'actifs qui ne diffèrent de la moyenne que par un seul attribut. Si l'attribut est mesuré à l'aide d'une valeur scalaire telle que la superficie en pieds carrés, un échantillon est doté d'une valeur élevée de cet attribut, l'autre d'une valeur faible, ce qui conduit à $2N + 1$ échantillons d'actifs, où N est le nombre d'attributs variés.

2.2 Renseignements sur les biens

Les sites d'annonces immobilières Zillow.com et Redfin.com proposent diverses caractéristiques des bâtiments à vendre, à louer ou en crédit-bail. Tous deux proposent une interface de système de renseignement géographique permettant de sélectionner une région, de rechercher un type de bien et de compiler des données sur l'adresse du site, l'âge du bâtiment, la superficie, le nombre d'étages, le nombre de sous-sols, le nombre de chambres et de salles de bain, etc. Grâce aux images satellites et de rue de Google Earth, il est possible de voir la topographie et l'occupation du sol à proximité, les dimensions des plans, les matériaux de couverture, et d'estimer la pente du toit, la taille des avant-toits et d'autres attributs importants pour une analyse de risque, mais pas pour un acheteur ou un vendeur de biens immobiliers.

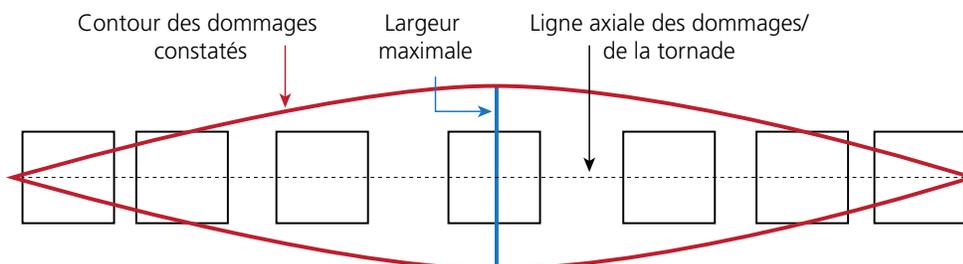
Porter et coll. (2021) ont effectué une enquête sur 102 maisons canadiennes, échantillonnant des communautés de petite, moyenne et grande taille à travers le Canada. Ils ont constaté par exemple que parmi les maisons récentes (construites entre 2002 et 2021) mises en vente en 2021, la maison médiane comportait deux étages, quatre chambres à coucher, trois salles de bain et une superficie de 2 100 pieds².

L'analyse aura besoin du calcul des charges permanentes (qui résistent au soulèvement). De nombreuses sources fournissent les poids unitaires des matériaux de construction. Roof Hub (2022) fournit les poids unitaires pour les toitures. Gray (2022) donne les poids unitaires des fermes de toit. Boise Cascade (ND) fournit des poids pour l'isolant de toiture, les plaques de plâtre, la moquette et le rembourrage, les solives, le placage de briques d'argile et les planches de vinyle. Performance Panels (2023) fournit des poids pour les revêtements.

2.3 Renseignements sur les risques

Le Code national du bâtiment 2020 (Conseil national de recherches du Canada 2020) indique les pressions horaires du vent avec une fréquence de dépassement de 0,1 et 0,02 par an à 680 lieux nommés. Le Design Value Explorer du PCIC (Pacific Climate Impacts Consortium 2023) propose ces quantités pour diverses hausses de température moyenne à l'échelle mondiale, en s'appuyant sur l'analyse d'Environnement et Changement climatique Canada (Cannon 2020). Le Northern Tornado Project (cite) propose une base de données sur les emplacements des tornades, la longueur et la largeur des trajectoires, ainsi que l'estimation de l'échelle Fujita améliorée. Sills et coll. (2020) suggèrent que les tornades ont tendance à avoir une trajectoire en forme de lentille, comme sur la Figure 2. Ramsdell et coll. (2007) proposent également des estimations de la surface moyenne de la trajectoire en fonction de l'échelle EF, ainsi que la distribution de la pression locale du vent dans les tornades de différentes échelles EF.

Figure 2. Trajectoire en forme de lentille d'une tornade (Sills et coll. 2020)



2.4 Renseignements structurels

Le Code national du bâtiment 2020 (Conseil national de recherches du Canada 2020, pages 4 à 30) propose une méthode standard pour estimer les pressions statiques équivalentes du vent sur une partie ou la totalité d'une surface d'un bâtiment. Une limite notable de cette méthode est qu'elle offre un large écart de valeurs pour un coefficient de pression interne C_{pi} . Smith et coll. (1994) présentent des valeurs basées sur des essais de laboratoire en grandeur réelle d'un bâtiment ayant 2 % d'ouvertures murales et aucune cloison interne. Kopp et coll. (2008) présentent des valeurs basées sur des essais en soufflerie à échelle volumique d'une maison nord-américaine typique à deux étages avec diverses combinaisons d'ouvertures dans le gabarit, les murs, les plafonds et les événements.

2.5 Renseignements sur les dommages

Bardeaux. Koontz (2011) présente des essais en soufflerie de vitesses de vent qui provoquent le détachement des bardeaux.

Revêtement du toit. Prevatt et coll. (2009) récapitulent les essais de capacité de succion des revêtements de toiture provenant de diverses sources. Datin et coll. (2011), Lopez et coll. (2020), Gavanski et coll. (2014), et Henderson et coll. (2013) fournissent également des données pertinentes. Les essais examinent de nombreuses combinaisons, mais pas toutes, d'épaisseur de revêtement (OSB de 7/16 po, contreplaqué de 1/2 po, OSB de 1/2 p et contreplaqué de 5/8 po), de taille de clous (6d, 8d et 12d), de type de clou (courant, à tige annelée et en spirale), d'espacement (6/6 et 6/12) et d'espacement de la ferme (16 po, 24 po).

Résistance des éléments de fixation. Étant donné que l'article 6.2.2.2 de la norme CSA S520:22 précise les exigences de fixations pour le revêtement de toit en fonction de la résistance à l'extraction des clous, et non pas par type et taille des clous, il est donc utile de connaître les résistances à l'extraction de ces éléments. Luszczki et coll. (2013) présentent les résistances à l'extraction des clous 8d courants, annulaires (à tige annelée) et hélicoïdaux (à tige filetée), en retrait du bois épinette-pin-sapin du Sud n° 2 par 4 avec un espace de 0,40 pouce (10,2 mm) entre la tête du clou et le spécimen (pour représentant l'épaisseur du revêtement de toiture). Les forces d'extraction moyennes étaient de 0,730, 1,26 et 1,39 kN pour les clous courants, les clous à tige annelée et les clous à tige filetée, respectivement (164, 283 et 313 lbf). Les coefficients de variation étaient de 0,16, 0,17 et 0,25, respectivement, pour 10 spécimens chacun.

Assemblages toit-mur. Cheng (2004) fournit des résultats d'essais en laboratoire sur les assemblages à clous d'orteil pour les assemblages entre le toit et les murs. Simpson Strong-Tie (2023a) fournit des charges admissibles pour les sangles anti-tempête et les vis de ferme. N'ayant trouvé aucun résultat des tests expérimentaux publié concernant la résistance des assemblages toit-mur avec des vis de ferme, j'ai donc effectué une série d'essais de traction; voir l'annexe A pour obtenir les résultats.

Assemblages mur-mur. Engineering Toolbox (2023) fournit des capacités d'extraction pour les clous 16d couramment utilisés pour assembler les murs aux planchers. Simpson Strong-Tie (2023 b) fournit les charges admissibles pour les sangles LSTA.

Assemblages mur-fondation. Red Head (ND) fournit les capacités ultimes pour une variété d'ancrages de fondation.

2.6 Renseignements sur les pertes

De nombreux auteurs expriment la perte comme la somme du coût de réparation du bâtiment, du coût de réparation du contenu, des frais de subsistance additionnels ou d'autres pertes d'éléments temporels, de la valeur monétaire des décès, des blessures non mortelles et des blessures de stress post-traumatique, des impacts environnementaux tels que la valeur externalisée de l'émission intrinsèque du carbone, et d'autres encore. Multi-Hazard Mitigation Council (2019) est un exemple récent de nombreux travaux de ce type.

Marshall et Herzog (1999) proposent une équation pour le coût de réparation d'une toiture endommagée par la grêle, comme le produit de D (le nombre de bardeaux endommagés par carré de toiture), U (le coût unitaire de réparation d'un bardeau), R (un facteur pour tenir compte de la difficulté de la réparation), et A (la surface de la toiture en carrés de toiture). Ils suggèrent d'inclure un facteur de 1,1 à 1,2 dans U pour tenir compte des déchets.

Gordian (2023) propose des estimations de coûts pour diverses mesures de réparation des bâtiments. On y trouve notamment les coûts de démolition et de remplacement des revêtements de toiture de différentes épaisseurs et des fermes de toit. Les experts en sinistres des compagnies d'assurance ont tendance à utiliser le logiciel Xactimate (Xactware 2023), qui s'avère plus pratique.

En raison des dommages causés par le vent, le contenu d'une maison peut être exposé au vent et à l'eau et ses occupants doivent partir pendant les réparations. L'Insurance Information Institute (2023) indique que la plupart des assureurs offrent une couverture du contenu pour 50 à 70 % de la valeur du bâtiment. Des pertes supplémentaires pour frais de subsistance s'accumulent lorsque le propriétaire est déplacé de son domicile. Au Canada et aux États-Unis, il est courant d'assurer les propriétaires pour les frais de subsistance supplémentaires pour un seuil d'environ 20 % à 30 % le coût de remplacement de la maison (Ratesdotca 2023).

Une partie des pertes liées aux dommages matériels est externalisée sur le reste de la société à travers le dioxyde de carbone émis lors de la fabrication, de la livraison, de l'installation et de l'élimination des matériaux de construction. Selon Magwood et coll. (2023), la maison moyenne représente 202 kg d'équivalent CO₂ par mètre carré de surface de construction. Environnement et Changement climatique Canada (2023) estime présentement le coût social du carbone à 261 \$ par tonne de CO₂.

Il peut être intéressant d'estimer les moyennes pondérées des résultats en fonction de la population; Simplemaps.com (2023) donne des estimations de la population par ville, en utilisant pour l'essentiel la même orthographe que le tableau C-2 du Code national du bâtiment 2020.

3. Méthodes proposées

With the foregoing literature as a foundation, we now consider a methodology.

3.1 Analyse des biens

Prenons en considération les attributs qui ont probablement de l'importance pour une nouvelle maison canadienne à ossature de bois : la superficie, les étages, les types de toit (en croupe ou à pignon), les dimensions du plan, les matériaux de couverture et les matériaux de revêtement. Effectuons une enquête sur disons 100 maisons plus récentes dans les grandes, moyennes et petites communautés du sud du Canada, d'est en ouest, en utilisant une base de données immobilière en ligne telle que Zillow. Commençons par un bien unique avec des valeurs moyennes pour chaque attribut, en sélectionnant un modèle détaillé à partir d'une source pratique, comme les bâtiments modèles d'un projet de développement.

Nous concevons ensuite le bâtiment avec et sans les caractéristiques ajoutées qui nous intéressent. Nous dressons la liste des caractéristiques qui diffèrent. Nous caractérisons la conception de ces caractéristiques dans les conditions actuelles (par exemple, le Code national du bâtiment 2020 ou une autre référence) et dans les conditions hypothétiques (par exemple, la norme CSA S520:22). Ici, « caractériser la conception » signifie, indiquer les matériaux et les quantités requis par les conceptions « actuelles » et « hypothétiques », et utiliser des sources faisant autorité telles que les catalogues des fournisseurs de matériaux de construction et les manuels de coûts de construction pour estimer la différence de coût pour chaque caractéristique. Le coût marginal de la condition « hypothétique » est donné par l'équation suivante (1). Dans cette équation, C représente le coût marginal, i est un indice des N caractéristiques qui diffèrent entre la situation actuelle et la situation hypothétique, Q_i représente la quantité additionnelle de la caractéristique, et U_i le coût unitaire de cette caractéristique.

$$C = \sum_{i=1}^N Q_i U_i \quad (1)$$

3.2 Analyse des risques

Caractérisons le risque lié au vent en utilisant la mesure native du Code national du bâtiment. Puisque notre modèle sera appliqué au Canada, choisissons comme mesure de l'excitation environnementale la même que celle utilisée dans le Code national du bâtiment du Canada : la pression de la vitesse de référence q . Désignons $G(q)$ la fréquence annuelle moyenne avec laquelle q est dépassé, et calculons-la comme indiqué dans l'équation (2), comme la somme des risques liés aux vents en ligne droite et aux vents de tornade, désignés ici par $(G_1[q])$ et $(G_2[q])$ respectivement. Évaluons les deux courbes de danger à de nombreux niveaux de pression (disons $N = 50$). Pour tenir compte des changements climatiques, supposons une augmentation raisonnable de la température mondiale à la mi-vie d'un nouveau bâtiment (disons 2060) dans le cadre d'un scénario socio-économique commun raisonnable, disons SSP 3-7.0.

Pour chaque lieu d'intérêt, prenons deux paires de $G(q)$: une pour $G = 0,1$ et une pour $G = 0,02$, à partir d'une source faisant autorité. Comme le suggère le Code national du bâtiment du Canada (Conseil national de recherches 2020, p. C-9), le risque varie approximativement de façon linéaire par logarithme avec la vitesse, désignée ici par v . Commençons donc par des paires de $G_i(v)$ où $G_1 = 0,1$ et $G_2 = 0,02$, et pour chaque lieu d'intérêt, trouvons m et b pour répondre à l'équation (3) et évaluons à chacune les 50 valeurs de v qui correspondent à $q \in \{0,05, 0,10, \dots, 2,5\}$ kPa, en convertissant v et q par l'équation(4). Les valeurs de v et de q sont calculées à partir de la même source, mesurées en m/s et en kPa, respectivement, et en supposant un temps de calcul de la moyenne de 3 600 secondes.

$$G(q) = G_1(q) + G_2(q) \quad (2)$$

$$\ln(G_1(v)) = mv + b \quad (3)$$

$$q = 0.00064645v^2 \quad (4)$$

Pour le risque de tornade, calculons $G_2(q)$ comme indiqué dans l'équation suivante (5). Dans l'équation,

- λ_{\square} fait référence au taux d'occurrence des tornades dans une zone proche telle qu'une cellule de grille de 1 degré x 1 degré,
- $P[EF = j]$ désigne la probabilité conditionnelle qu'une tornade soit dotée de l'échelle Fujita améliorée j , étant donné qu'une tornade se produit,
- $A_{EF = j}$ représente la surface moyenne de l'empreinte d'une tornade EF j , en km^2 ,
- A_{\square} est la surface de la cellule de grille en km^2 à cette latitude, et
- $P[Q \geq q|EF = j]$ représente la fraction de la surface de l'empreinte d'une tornade EF j avec $Q \geq q$.

On peut dériver les taux d'occurrence λ_{\square} , les distributions EF $P[EF = j]$ et les zones de trajectoire à partir de sources d'observations empiriques telles que le Northern Tornado Project (2023). Si la source ne fournit que la longueur L et la largeur W de la trajectoire, on peut estimer la surface A de la trajectoire à partir d'équations (6), (7) et (8), en se basant sur la géométrie illustrée dans la Figure 3. (Il s'avère que $A = 2/3 \times L \times W$.)

Comment estimer la $P[Q \geq q|EF = j]$, c'est-à-dire la distribution de la pression locale du vent donnée par l'échelle EF? Ramsdell et coll. (2007) donnent la fonction de masse de probabilité de la pression locale du vent en fonction de l'échelle EF; voir le Tableau 1. Désignons $p_{EF = j}(q_i)$ la probabilité que $q \approx q_i$ étant donné que $EF = j$, comme indiqué dans le tableau, où i est un indice des intervalles locaux (lignes) et j est un indice des colonnes. On calcule ensuite $F_{EF = j}(q_i)$, la fonction de distribution cumulative de la pression locale du vent q étant donné $EF = j$, par l'équation suivante (9).

$$G_2(q) = \lambda_{\square} \sum_{j=0}^5 P[EF = j] \cdot \frac{A_{EF=j}}{A_{\square}} \cdot P[Q \geq q|EF = j] \quad (5)$$

$$A = R^2 (\gamma - \sin(\gamma)) \quad (6)$$

$$\gamma = 2 \left(\pi - 2 \tan^{-1} \left(\frac{L}{W} \right) \right) \quad (7)$$

$$R = \frac{1}{2} \frac{L}{\sin(\gamma/2)} \quad (8)$$

$$F_{EF=j}(q_i) = \sum_{h=0}^i p_{EF=j}(q_h) \quad (9)$$

$$F_{EF=j}(q) \approx \Phi \left(\frac{\ln(q/\theta_j)}{\beta_j} \right) \quad (10)$$

$$P[Q \geq q|EF = j] = 1 - \Phi \left(\frac{\ln(q/\theta_j)}{\beta_j} \right) \quad (11)$$

$$G_2(q) = \lambda_{\square} \cdot C(q) \quad (12)$$

Il est possible d'ajuster, par maximum de vraisemblance ou par d'autres méthodes, une fonction de distribution log-normale pour la pression locale du vent aux valeurs discrètes de $F_{EF = j}(q_i)$, une distribution pour chaque échelle EF, comme le suggère l'équation suivante (10). Ainsi, on donne à chaque l'échelle EF une paire de paramètres θ et β pour estimer la probabilité de non-dépassement de toute valeur de q étant donné $EF = j$, et on peut calculer $P[Q \geq q|EF = j]$ à l'aide de l'équation suivante (11). On peut appliquer le théorème des probabilités totales et évaluer la somme dans l'équation (5) pour chacune des nombreuses valeurs de q , en substituant la fonction $C(q)$ à la somme, comme indiqué dans l'équation (12).

Figure 3. Estimation de la surface de la trajectoire de la tornade à partir de la longueur et de la largeur de la trajectoire

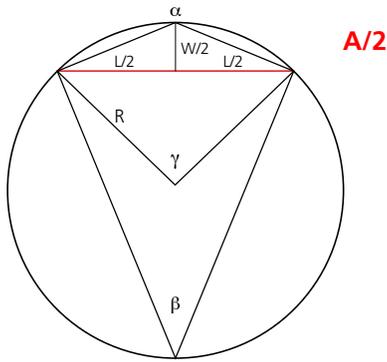


Tableau 1. Fonction de masse de probabilité de la pression locale du vent q donnée par l'échelle Fujita améliorée (d'après Ramdsdell et coll. 2007)

Int, local i	v_i (mph)	v_i (m/s)	q_i (kPa)	EF0	EF1	EF2	EF3	EF4	EF5
0	65-85	29-37	0,5-0,9	1,000	0,772	0,616	0,529	0,543	0,538
1	86-110	38-49	1,0-1,6		0,228	0,268	0,271	0,238	0,223
2	111-135	50-60	1,6-2,4			0,115	0,133	0,131	0,119
3	136-165	61-73	2,4-3,5				0,067	0,056	0,070
4	165-200	74-89	3,6-5,2					0,032	0,033
5	200-302	89-135	5,2-11,8						0,017

3.3 Analyse structurelle

Il est possible d'organiser l'analyse structurelle par plusieurs moyens pratiques; je propose d'utiliser les procédures statiques de l'article 4.1.7.3 du Code national du bâtiment du Canada. Je ne détaillerai pas les procédures ici; le lecteur peut les constater assez facilement. Mais en résumé, on calcule la pression externe p et la pression interne p_i par les équations (13) et (14) respectivement. Dans les équations,

- I_W fait référence au facteur d'importance (1,0 pour une interne),
- q est la pression de vitesse de référence,
- C_e est le facteur d'exposition selon l'article 4.1.7.3 phrase 5,
- C_t est le facteur topographique selon l'article 4.1.7.4,
- C_g est le facteur d'effet de rafale selon l'article 4.1.7.3 phrase 8,
- C_p est le coefficient de pression externe conformément aux articles 4.1.7. et 4.1.7.6,
- C_{ei} est le facteur d'exposition à la pression interne conformément à l'article 4.1.7.3 phrase 7,
- C_{gi} est le facteur d'effet de rafale interne conformément à l'article 4.1.7.3 phrase 10, et
- C_{pi} est le coefficient de pression interne conformément à l'article 4.1.7.7.

Pour l'analyse des dommages causés à certains éléments de construction (en particulier les bardeaux de toiture), nous avons besoin de la vitesse du vent, que nous pouvons obtenir en réarrangeant l'équation de la pression en fonction de la vitesse dans le Code national du bâtiment du Canada 2020, division B, page C-9. La forme réarrangée apparaît dans (15) où les unités de v et de p sont respectivement m/sec et kPa. Il s'agit d'évaluer les forces sur les éléments de construction contrôlés par la force (principalement les assemblages) et la vitesse sur les éléments

contrôlés par la vitesse (par exemple, les bardeaux de toiture) pour toute valeur donnée de q . Ici, « contrôlé par la force » signifie que la fonction de fragilité qui relie la probabilité de dommages à la réponse structurelle prend la force comme donnée d'entrée. De même, l'expression « contrôlée par la vitesse » signifie que la fonction de fragilité prend la vitesse comme donnée d'entrée.

$$p = I_W q C_e C_t C_g C_p \quad (13)$$

$$p_i = I_W q C_{ei} C_t C_{gi} C_{pi} \quad (14)$$

$$v = 39.331 \cdot |p|^{0.5} \quad (15)$$

3.4 Analyse des dommages

Dans l'analyse des dommages, on introduit la demande de l'analyse structurelle dans les fonctions de fragilité des composants, qui prennent généralement la forme de l'équation suivante (16). Dans cette équation,

- $P_f(r)$ désigne la probabilité de défaillance du composant lorsqu'il est objet d'une demande r ,
- Φ désigne la fonction de distribution cumulative normale standard évaluée au terme entre parenthèses, et
- θ et β sont les paramètres de la fonction de fragilité. Il s'agit respectivement de la capacité médiane et de l'écart-type du logarithme naturel de la capacité.

Voir la section application plus loin pour les valeurs des paramètres de fragilité utilisés dans la présente étude de cas.

Le nombre attendu de composants défaillants est estimé comme indiqué dans l'équation suivante (17). Dans cette équation, $E[A|B]$ désigne la valeur attendue de A en fonction de B , N_f désigne le nombre d'instances défaillantes du composant, et N est le nombre d'instances.

Dans la présente étude, je ne propose pas d'effectuer une analyse dynamique pour suivre la redistribution de la charge. Le processus et l'ordre dans lesquels les composants cèdent sont probablement si aléatoires que tout calcul de la redistribution de la charge ne fournit probablement qu'une précision illusoire.

$$P_f(r) = \Phi\left(\frac{\ln(r/\theta)}{\beta}\right) \quad (16)$$

$$E[N_f|r] = N \cdot P_f(r) \quad (17)$$

3.5 Analyse des pertes

Le coût de réparation de toutes les instances endommagées d'une catégorie de composants donnée est calculé selon l'équation suivante (18). Dans cette équation,

- k représente un indice des catégories de composants,
- U représente maintenant le coût unitaire de réparation d'une instance de la catégorie de composants,
- N_f et N sont définis pour l'analyse des dommages, et
- E représente un seuil de composants endommagés au-delà duquel il faut démolir et remplacer toutes les instances de la catégorie de composants.

Comment déterminer R ? En se basant sur des suppositions. Il semble probable que les experts en sinistres et les prestataires de services de réparation utiliseront un tel seuil et que le choix de R variera entre eux. Le coût de réparation du bâtiment est alors donné par l'équation suivante (19). Le facteur de dommage moyen (valeur attendue du coût des réparations en tant que fraction du coût de remplacement à neuf) est donné par l'équation (20). Dans cette équation, V_b représente le coût de remplacement (neuf) du bâtiment. Si nous évaluons l'équation (20) à plusieurs niveaux de q , nous obtenons une fonction de vulnérabilité $y(q)$: une relation entre la valeur attendue du facteur de dommage (coût de réparation en tant que fraction du coût de remplacement à neuf) et la pression de référence q .

Appliquons la fonction de vulnérabilité de la réparation du bâtiment à la valeur du contenu, aux frais de subsistance additionnels et au carbone. Nous ignorons les décès, les blessures médicales, les traumatismes post-traumatiques et les autres catégories de pertes : animaux domestiques, souvenirs, augmentation du nombre de sans-abri et autres conséquences. Ce qui signifie que les estimations de pertes produites ici, et les bénéfiques, auront tendance à sous-estimer le coût réel des dommages causés par le vent.

La valeur attendue de la perte associée à la pression du vent de référence q est alors donnée par l'équation suivante (21). Dans l'équation, V_c désigne la valeur du contenu, que nous pouvons estimer de manière prudente à $0,5V_b$ et qui est suggérée par Ratesdotca (2023). V_{ALE} représente la valeur des frais de subsistance supplémentaire si la maison est une perte totale; nous pouvons l'estimer à $0,2V_c$, comme le suggère l'Insurance Information Institute (2023). V_{CO2} peut être calculé selon l'équation suivante (21) dans laquelle A représente la surface du bâtiment en mètres carrés, e_{CO2} représente l'émission intrinsèque de carbone par mètre carré de surface de bâtiment, par exemple, d'après Magwood et coll. (2023), et v_{CO2} représente le coût social du carbone, par exemple, d'après Environnement et Changement climatique Canada (2023).

Nous pouvons maintenant estimer les avantages d'une conception supérieure au code. L'équation (23) donne la valeur attendue de la perte annualisée. Dans cette équation, i est un indice à N niveaux de la pression de référence q , $L(q)$ provient de l'équation (21) et $G(q)$ de l'équation (2).

L'équation (24) donne la valeur actualisée du bénéfice (perte évitée). Dans cette équation,

- EAL et EAL' font référence aux résultats de l'équation (23) pour la conception en l'état et la conception par simulation (supérieure du code) respectivement,
- r est le taux d'actualisation après inflation pour les investissements personnels, et
- t est la durée de vie utile du bien.

$$L_{bk} = E[N_f | r] \cdot U \quad E[N_f | r] / N < R \quad (18)$$

$$= N \cdot U \quad E[N_f | r] / N \geq R$$

$$L_b = \sum_{k=1}^M L_{bk} \quad (19)$$

$$y = \frac{L_b}{V_b} \quad (20)$$

L'équation (25) donne le rapport avantage-coût. Dans cette équation, C est le coût marginal pour se conformer aux besoins supérieurs au code, d'après l'équation (1).

$$L(q) = y(q) \cdot (V_b + V_c + V_{ALE} + V_{CO2}) \quad (21)$$

$$V_{CO2} = A \cdot e_{CO2} \cdot v_{CO2} \quad (22)$$

$$EAL = \int_{q=0}^{\infty} L(q) \left| \frac{dG(q)}{dq} \right| dq \quad (23)$$

$$\approx \sum_{i=1}^{N-1} L(q_i) (G(q_i) - G(q_{i+1}))$$

On peut calculer la moyenne pondérée par la population du bénéfice B et du rapport avantage-coût BCR à l'aide des équations suivantes (26) et (27). Dans la première, o désigne un indice de lieux, et P_o est la population qui s'y trouve.

$$B = (EAL - EAL') \frac{(1 - \exp(-rt))}{r} \quad (24)$$

$$BCR = \frac{B}{C} \quad (25)$$

$$\bar{B} = \frac{\sum_o B_o \cdot P_o}{\sum_o P_o} \quad (26)$$

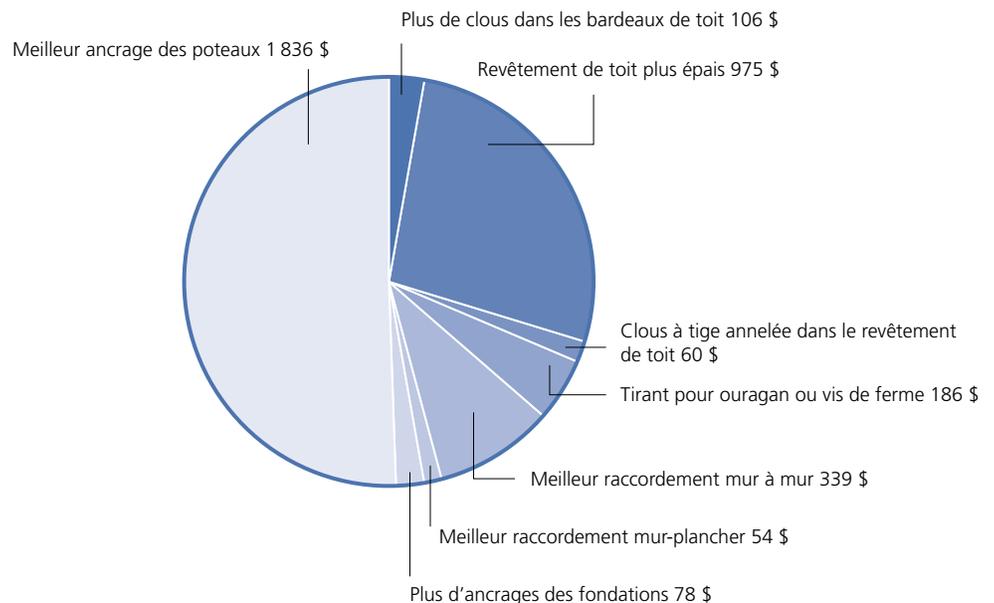
$$\overline{BCR} = \frac{\bar{B}}{C} \quad (27)$$

Tableau 2. Coûts pour se conformer aux éléments de charge verticale et latérale de la norme CSA S520:22

Fonctionnalité	Exigences du CNB 2020	Exigences de la norme CSA S520:22	Coût unitaire		Qté	Coût
Couverture de toit	Bardeaux d'asphalte	6 clous et non 4	0,03 \$	clou	2,667	88 \$
Revêtement de toiture	OSB de 7/16 po	OSB de 5/8 po	0,41 \$	pi ca	2,000	813 \$
Fixations du revêtement de toit	Clous courants 8 d à 6 po/12 po	Clous à tige annelée de 6 po/6 po	S/O		750	50 \$
Assemblages toit-mur	3 clous en biais	Vis de ferme de +6 po	1,87 \$	unité	83	186 \$
Assemblages mur- mur	Aucun	Vis de fermes T&B de 24 po OC	1,87 \$	unité	151	339 \$
Assemblage mur-plancher	Aucun	Clous 8d de 4 po T&B	0,05 \$	unité	900	45 \$
Assemblage mur-fondation	5/8 x 8po AB à 8'OC	5/8 x 8 po AB à 6'OC	10,88 \$	unité	6	65 \$
Protection contre le soulèvement des poteaux	Base du poteau	Coiffe-pilier RC de +8 po	510,00 \$	unité	3	1 530 \$
Transmission des charges verticales, coût de base						3 028 \$
Frais généraux + bénéfiques						606 \$
Sous-total de la transmission des charges verticales						3 634 \$
Murs de pignon	Sans entraves	Entretoise + bloquée	1,88 \$	pi lin.	45	85 \$
Revêtement mural	Aucun	OSB de 7/16 po	1,27 \$	pi ca	2,125	2 699 \$
Revêtement du plancher principal	Brique + isolant rigide	Idem	0,00 \$		1,100	0 \$
Revêtement du plancher du 2 ^e étage	Vinyle + isolant rigide	Idem	0,00 \$		1,025	0 \$
Portes de garage	Non résistantes au vent 8 pieds	ASTM E330 8 pieds	207,00 \$	unité	2	414 \$
Fenêtres	Non résistantes aux chocs	Film résistant aux chocs	6,80 \$	pi ca	230	1 564 \$
Transmission des charges latérales, coût de base						4 761 \$
Frais généraux + bénéfiques						952 \$
Sous-total de la transmission des charges latérales						5 714 \$
Total						9 348 \$

* sq = pieds carrés; sl = pieds linéaires.

Figure 5. Sources du coût de 3 600 \$ des éléments de la transmission des charges verticales, y compris le matériel, la main-d'œuvre, l'équipement, les frais généraux et les bénéfiques



4.2 Risques

Pour appliquer l'équation(3), j'ai utilisé le Design Value Explorer du Pacific Climate Impacts Consortium (2023), Tableau C-2, avec CF = 2,0 °C de réchauffement, sur la base d'une voie socio-économique commune supposée SSP 3-7.0. Pour l'équation(5), j'ai évalué λ_{\square} pour chaque cellule de grille 1° x 1° dans la latitude $\epsilon \{42, 43, \dots 61\}$ x la longitude $\epsilon \{-130, -129, \dots -59\}$ du Northern Tornado Project. Les résultats sont présentés dans la Figure 6. J'ai interpolé spatialement λ à chaque endroit du tableau C-2 en utilisant les équations (28), (29) et (30). Dans les équations, les indices désignent les quatre coins de la cellule de la grille dans laquelle se trouve le lieu : 00 le point de grille dans le coin inférieur gauche de la cellule, 10 le coin inférieur droit, 01 le coin supérieur gauche et 11 le coin supérieur droit. N et T désignent respectivement la latitude et la longitude. L'analyse des données du Northern Tornado Project à la date de juin 2023 suggère des zones de trajectoire moyenne indiquées dans le Tableau 3.

J'ai pris les zones de trajectoire pour EF0 à EF3 à partir des données du projet Northern Tornado. Les données sont trop rares pour EF4 et EF5, et les zones de Ramsdell et coll. (2007) pour EF4 et EF5 semblent trop petites en comparaison, j'ai donc extrapolé pour EF = 4 et 5 à l'aide de l'équation (31). J'ai dérivé $P[EF = j]$ à partir des données du Northern Tornado Project; voir la Figure 7. L'équation (32) donne la superficie d'une cellule de grille carrée de 1 degré de côté A_{\square} , où T désigne la latitude. J'ai utilisé les données de Ramsdell et coll. (2007) pour estimer les paramètres θ_j et β_j . Les résultats sont présentés dans le Tableau 4.

L'évaluation de la somme dans l'équation (5) produit la fonction $C(q)$ de l'équation (12) illustrée à la Figure 8A, où q est mesuré avec un temps moyen de 3 secondes. Pour appliquer l'équation (2), nous avons besoin de q avec un temps moyen commun. Il n'existe pas de pression tornade avec un temps moyen d'une heure, mais appliquons Durst (1960) et convertissons le temps moyen de 3 secondes en temps en moyenne d'une heure par l'intermédiaire de l'équation (33) où le terme au carré reflète le fait que Durst (1960) se réfère à la vitesse et que la pression est égale au carré de la vitesse. Avec λ de Figure 6 et $C(q)$ de la Figure 8 (avec une mise à l'échelle appropriée pour le temps de calcul de la moyenne), on peut évaluer $G(q)$ pour n'importe quel endroit. Je l'ai fait pour chaque endroit du tableau C-2 du Code national du bâtiment du Canada, j'ai appliqué l'équation (2) et j'ai tabulé le risque de vent $G(q)$ pour $q \in \{0,05, 0,10, \dots 2,5\}$ kPa. La Figure 9 présente des exemples de résultats : ligne droite, tornade et risque total de vent à London, en Ontario. Des tornades peuvent s'y produire, mais leur taux d'occurrence empirique est faible, de sorte que l'aléa éolien total est à peu près le même que l'aléa éolien en ligne droite.

$$\lambda = \lambda_{00} + (\lambda_{10} - \lambda_{00})x + (\lambda_{01} - \lambda_{00})y + (\lambda_{11} + \lambda_{00} - \lambda_{10} + \lambda_{01})xy \quad (28)$$

$$x = \frac{N - N_{00}}{N_{10} - N_{00}} \quad (29)$$

$$y = \frac{T - T_{00}}{T_{01} - T_{00}} \quad (30)$$

$$A_{EF=j} = A_{EF=3,NTP} \cdot \frac{A_{EF=j,Ramsdell}}{A_{EF=3,Ramsdell}} \quad (31)$$

$$A_{\square} = (111km)^2 \cdot \cos(T) \quad (32)$$

$$q_{1hr} = \frac{q_{3sec}}{1.48^2} \quad (33)$$

Figure 6. Taux d'occurrence des tornades λ , basé sur les données du Northern Tornado Project

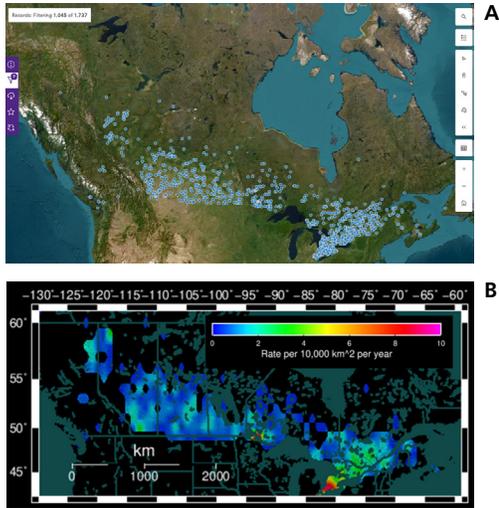


Figure 7. Répartition de la taille des tornades au Canada

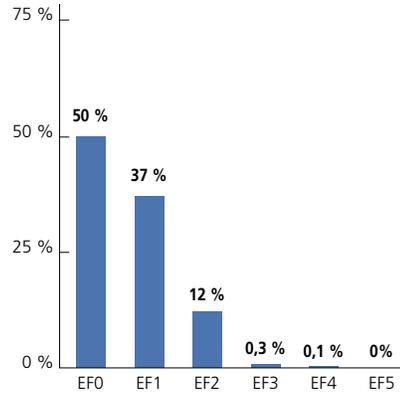


Tableau 3. Estimation de la surface moyenne de la voie ferrée en fonction de l'indice EF

	EF0	EF1	EF2	EF3	EF4	EF5	Somme
Compte	526	390	125	3	1	0	1045
%	50 %	37 %	12 %	0,3 %	0,1 %	0 %	100 %
Compte avec la surface	77	199	112	3	1	0	392
Zone km ² de NTP	0,79	1,63	6,69	27,83	12,57	NA	
Superficie en km ² par Ramsdell et coll.	0,08	0,76	2,88	8,13	13,00	15,58	
Zone utilisée ici $A_{EF=j}$, km ²	0,79	1,63	6,69	27,83	44,46	85,16	

Table 4. Wind pressure distribution by EF rating

Paramètres	EF0	EF1	EF2	EF3	EF4	EF5
q_j	0,77	0,89	0,89	0,98	0,99	1,02
b_j	0,05	0,07	0,16	0,45	0,48	0,53

Figure 8. Fonction du coefficient de risque de tornade $C(q)$ pour une période de 3 secondes q

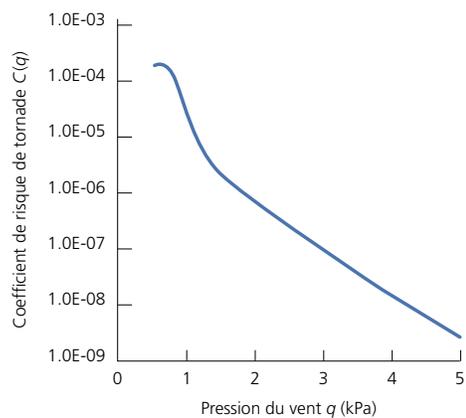
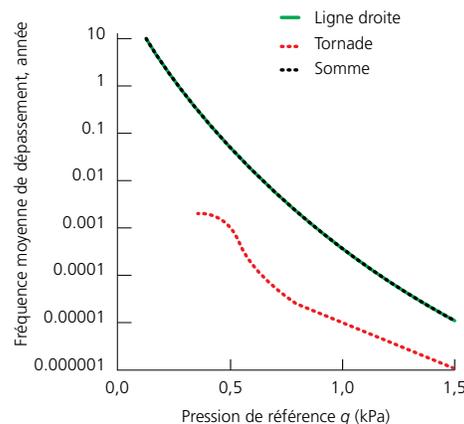


Figure 9. Risque lié au vent à London, Ontario



4.3 Charges

J'ai effectué un métré et calculé les charges permanentes en utilisant les poids unitaires des sources mentionnées ci-dessus. L'ensemble de la maison, des fondations au sommet, pèse environ 96 000 kg (212 000 lb), soit environ 470 kg/m² (97 lb/pi²) de surface de plancher utilisable, ce qui est raisonnable compte tenu du revêtement en briques du rez-de-chaussée. Le Tableau 5 donne les charges permanentes sur les murs périphériques. Les détails des charges de vent sont omis ici par souci de concision; ils sont disponibles selon le relevé de disponibilité des données. En bref, je calcule les charges de toiture sur les angles, les bords et les zones de panneaux; à l'extrémité exposée au vent et dans le reste du bâtiment; en terrain ouvert et accidenté; et uniquement pour un site de niveau. Pour calculer les pressions internes, j'ai considéré que la maison était dotée d'ouvertures non uniformément réparties, dont aucune n'est importante. Pour le bâtiment tel qu'il est, j'ai choisi une valeur de C_{pi} tirée du Tableau 4.1.7.7 du Code national du bâtiment 2020 : -0,225, à mi-chemin de la valeur minimale extrême de -0,45 (et j'ai testé la sensibilité plus tard). Cette valeur correspond généralement aux minima de C_{pi} sur la plupart des angles de vent dans les cas 2, 3 et 4 de Kopp et coll. (2008), dans lesquels l'ouverture dominante est une porte, une petite fenêtre ou une grande fenêtre.

Tableau 5. Charges permanentes sur les assemblages des murs périmétriques

Assemblage	Charge permanente (kN/m mur)
Du toit au mur	0,3
2 ^e mur d'étage au 2 ^e plancher	1,0
1 ^{er} mur d'étage au 1 ^{er} plancher	3,3
Mur de soutènement à la fondation	5,3

4.4 Dommages

Le Tableau 6 résume les capacités de défaillance des composants utilisées ici comme valeurs de paramètres pour l'équation (16). Ici, la défaillance fait référence à la rupture de l'assemblage.

Tableau 6. Capacités des composants utilisés ici

Composant	θ	β	Source, commentaire
Bardeaux de toit 4 clous	60 m/sec	0,21	Koontz (2011) couche unique
Bardeaux de toit 6 clous	90 m/sec	0,21	Koontz (2011) couche unique \times 1,5
OSB de 7/16 po par clous courants 8 d de 6/12	3,2 kPa	0,15	Sutt (2000) par Prevatt et coll. (2009)
OSB de 5/8 po par clou 8d à tige annelée de 6/6	6,0 kPa	0,15	Sutt \times effet multiplicatif moyen des clous à tige annelée par rapport aux clous ordinaires \times effet d'un plus grand nombre de clous; d'autres sources
Toit-mur : 3 clous en biais 16d	1,70 kN	0,25	Tests effectués dans le cadre de ce travail; voir l'annexe A; environ 50 % de plus que la valeur de Cheng (2004), soit 1,11 kN.
Toit-mur : 3 clous en biais 16 d plus vis de ferme de 6 po	8,16 kN	0,18	Tests effectués dans le cadre de ce travail; voir l'annexe A. Environ 5 % plus petit que Simpson Strong-Tie (2023a) : 570 lbf \times 3,0 FOS
Mur-mur avec 2 chacun. 16d à 16 OC	3,0 kN	0,4	Boîte à outils pour l'ingénierie (2012)
Mur-mur : vis de fermes de 6 pouces T&B à 24 OC	6,46 kN	0,18	Tests effectués dans le cadre de ce travail; voir l'annexe A. θ est la différence entre les assemblages avec et sans vis de ferme.
Mur-fondation 5/8 \times 8 AB	84,3 kN	0,25	Ancrage à tête rouge (ND) Truebolt dans le béton 28 MPa, 5/8 po de diam \times 5-1/8 po de profondeur d'encastrement \times 6,5 po/5,125 po

4.5 Perte

Le Tableau 7 résume les coûts unitaires de réparation utilisés ici. Les quatre premiers éléments de la liste – bardeaux de toiture, revêtement et fermes de toit – semblent faciles à estimer, mais les trois derniers sont difficiles. J’ai fait l’hypothèse que la défaillance des assemblages mur-mur et des assemblages mur-fondation entraînait des pertes importantes : entre 20 % et 80 % de la valeur de la maison, comme le montre le tableau. Les zones font référence aux parties du bâtiment définies dans la Figure 4.1.7.6.-A du Code national du bâtiment 2020, actions structurelles primaires résultant de la charge de vent agissant simultanément sur toutes les surfaces des bâtiments bas. Remarquez que les pertes reflètent les réparations du bâtiment, le contenu, les frais de subsistance additionnels et le carbone, le dernier représentant une très petite fraction du total, environ 2 %.

Tableau 7. Coûts unitaires de réparation

Composant	U	R	Source, commentaire
Bardeaux de toiture	252 \$/ca	0,5	Porter (2022). 1 ca = 1 carré de couverture, 100 pied ²
OSB de 7/16 avec clous 8d courants de 6/12	2,96/pied ²	0,5	Gordian (2023); ajout de bardeaux
OSB de 5/8 avec clous 8d à tige annelée 6/12	3,32/pied ²	0,5	Gordian (2023); ajout de bardeaux
Ferme de toit (assemblages toit- murs)	7,70 \$/pied ²	0,5	Gordian (2023); ajout d’un revêtement et de bardeaux
Assemblages mur à mur	6 600 \$		RCN × fraction des assemblages qui cèdent
Assemblages mur-fondation	11 000 \$		RCN × fraction des assemblages qui cèdent

4.6 Résultats

La Figure 10 présente la fonction de vulnérabilité résultante pour une exposition approximative, c’est-à-dire pour des emplacements urbains, suburbains et boisés, ce qui semble refléter l’exposition de la plupart des maisons canadiennes. Les fonctions de vulnérabilité semblent plausibles, la conception actuelle subissant une forte augmentation des pertes à des pressions de référence correspondant à des vitesses de vent de tornades EF0, et la conception hypothétique n’augmentant qu’à des pressions de référence correspondant à des vitesses de vent EF3 et plus.

En appliquant ces fonctions de vulnérabilité aux courbes d’aléas à chacun des 680 endroits du tableau C-2 du Code national du bâtiment 2020, j’ai estimé le rapport coûts-avantages à chaque endroit et j’ai calculé que l’avantage moyen pondéré en fonction de la population était d’environ 22 000 dollars, soit environ six fois le coût des éléments qui contribuent à résister au soulèvement dans la transmission des charges verticales.

Le Tableau 8 présente les résultats moyens pondérés par la population. Il tient compte des résultats attendus pour les conditions actuelles (conception du Code national du bâtiment 2020) et les conditions hypothétiques (exigences de la norme CSA S520:22 pour les éléments qui résistent au soulèvement). Ses lignes indiquent les pertes annualisées attendues par bâtiment, la valeur actuelle des pertes futures en supposant un taux d’actualisation après inflation de 2 % et une durée de vie réaliste du bâtiment de 75 ans, les avantages et le rapport coûts-avantages susmentionnés, la fréquence et la gravité des pertes, ainsi que la probabilité d’une perte au cours de la durée de vie du bâtiment. La fréquence se réfère ici au taux auquel les pertes dépassant un certain seuil L_0 se produiront. J’ai utilisé un seuil de $L_0 = 5\ 000$ \$. La gravité désigne la valeur attendue de la perte conditionnée par la survenance d’une perte supérieure à L_0 .

À titre de comparaison, les données de CatIQ (2023) indiquent que les habitations canadiennes assurées ont subi en moyenne 0,008 sinistre éolien par police et par an au cours de la période 2013-2022 (soit la moitié du taux de 0,018 dans le Tableau 8) bien que les chiffres de CatIQ excluent les sinistres dans des cas qui ne sont pas considérés comme des catastrophes), avec une gravité moyenne des sinistres d'environ 13 000 \$ (contre 17 000 \$ dans le Tableau 8). Compte tenu des sinistres non catastrophiques absents des données du CatIQ, les deux chiffres concordent raisonnablement bien.

La Figure 11 montre comment le rapport coûts-avantages varie géographiquement en fonction du risque de vent. Là où le risque de vent est faible, les avantages sont faibles. Lorsqu'il est élevé, ils sont importants. Parmi les 680 localités considérées ici, le rapport coûts-avantages varie de presque 0 à plus de 100. Sa moyenne non pondérée est de 14:1. Les statistiques présentent une distribution approximativement log-normale, mais avec une grande variabilité : l'écart-type du logarithme naturel pour une distribution log-normale paramétrique est égal à 1,5.

Figure 10. Fonctions de vulnérabilité pour les conditions actuelles et les conditions hypothétiques

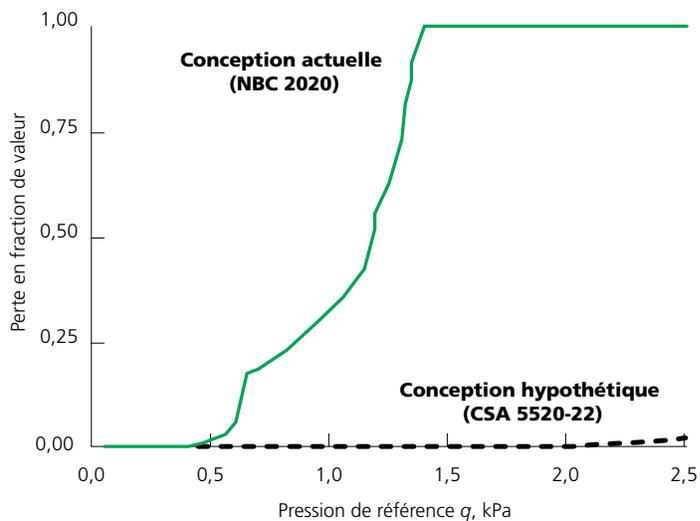


Figure 11. Carte du rapport coûts-avantages

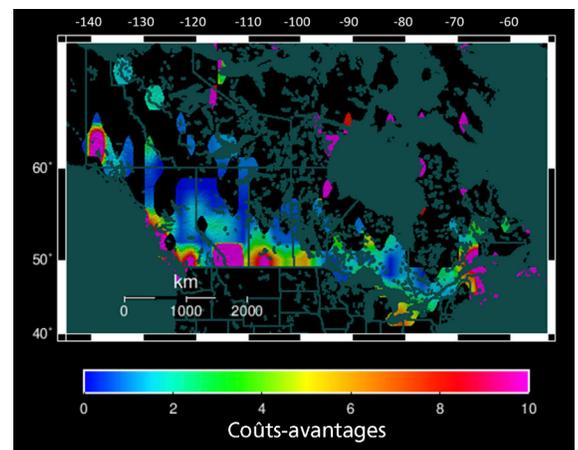


Tableau 8. Résumé des résultats moyens pondérés en fonction de la population

Quantité	Condition actuelle	Condition hypothétique	Signification
PMA	560 \$	<0,01 \$	Perte moyenne annualisée pondérée en fonction de la population, \$/an
VP (perte)	22 000 \$	<1 \$	Valeur actuelle de la perte supérieure à L_0
B		22 000 \$	Prestation moyenne pondérée en fonction de la population
Rapport		6.1	Rapport moyen coûts-avantages pondéré par la population
Fréq ($L > L_0$)	0.018	<0,001	Fréquence (cas/an) entraînant une perte supérieure à L_0
Gravité	17 000 \$	6 100 \$	Gravité de la perte conditionnée par une perte supérieure à L_0

Figure 12. Diagramme de tornade des résultats de l'étude de sensibilité

4.7 Étude de sensibilité

Plusieurs choix de paramètres affectent le bénéfice, le rapport coûts-avantages et les résultats discutés ci-dessus. J'ai effectué une analyse de sensibilité déterministe : que se passe-t-il lorsque l'on fait différents choix de modélisation ou que l'on utilise différentes valeurs de paramètres? J'ai calculé le rapport moyen coûts-avantages pondéré en fonction de la population en faisant varier une valeur de paramètre à la fois entre une valeur faible et une valeur élevée, tout en gardant tous les autres paramètres à leur meilleure valeur estimée.

Le Tableau 9 présente les huit choix qui semblaient les plus susceptibles d'affecter le rapport moyen coûts-avantages pondéré. Cinq paramètres – C_{pi} , C_t , r , t , et L_0 – sont expliqués ci-dessus. Les trois choix de modélisation sont les suivants. Que se passerait-il si l'on ne mettait en œuvre ces choix que là où ils sont rentables? Que se passerait-il si la défaillance des assemblages mur à mur n'entraînait pas de pertes catastrophiques, mais plutôt des pertes proportionnelles au nombre d'assemblages défaillants? Idem pour la défaillance des ancrages entre les murs et les fondations.

La Figure 12 présente les résultats. Chaque barre montre comment un choix affecte le rapport coûts-avantages. Ses extrémités sont les valeurs du rapport coûts-avantages qui résultent du choix de la valeur haute ou basse du paramètre. Le tableau présente les paramètres classés par ordre décroissant d'impact sur le rapport coûts-avantages. L'axe vertical croise le rapport coûts-avantages à la valeur de référence de 6, c'est-à-dire avec chaque paramètre organisé à sa meilleure estimation. Le diagramme montre que C_{pi} et C_t affectent le plus fortement le rapport et que seule une faible valeur de C_{pi} produit un rapport inférieur à 1,0.

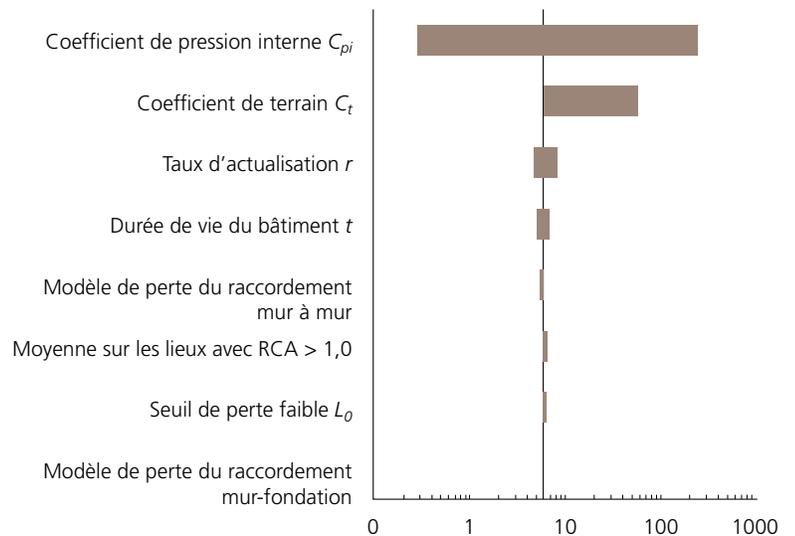


Tableau 9. Données de l'étude de sensibilité déterministe

Choix des paramètres ou de la modélisation	Faible	Idéal	É
Terrain et coefficient de terrain C_t	0,7	0,7	1
Coefficient de pression interne C_{pi}	-0,45	-0,225	0,3
Taux d'actualisation r	0,01	0,02	0,03
Seuil de petites pertes L_0	500 \$	5 000 \$	5 000 \$
Vie des bâtiments t	50	75	100
Moyenne des lieux où le RCA est > 1,0	Non	Non	Oui
Perte de l'assemblage mur à mur	Linéaire	Catastrophique	Catastrophique
Perte d'ancrage des fondations	Linéaire	Catastrophique	Catastrophique

5. Conclusions

J'ai entrepris de déterminer si la construction de nouvelles maisons à ossature de bois pour résister aux vents violents permet à la société de réaliser des économies à long terme. J'ai mis l'accent sur les améliorations clés des transmissions des charges verticales pour résister au soulèvement du vent dans la norme canadienne CSA S520:22 qui dépassent les besoins du Code national du bâtiment de 2020. Je propose une méthode analytique d'ingénierie éolienne, basée sur la performance, qui traite la vitesse du vent et la fragilité des composants comme des facteurs incertains, et la géométrie, la masse et le coût des réparations comme des facteurs déterministes. J'ai appliqué la méthode à un seul cas d'essai : une maison de 2 étages, de 2 180 pieds², avec des toits à pignon et des toits en croupe.

Les caractéristiques ajoutent 1 % au coût de construction (1,70 \$/pi² ou 3 600 \$), y compris les matériaux, la main-d'œuvre, l'équipement, les frais généraux et les bénéfices. Si l'on considère le risque de vent linéaire et de tornade et que l'on calcule la moyenne de la population canadienne, elles permettent d'éviter 22 000 dollars de pertes futures (soit un rapport coûts-avantages de 6 pour 1). Les caractéristiques de conception réduisent la fréquence d'un sinistre de 5 000 \$ d'environ 0,02 par an à près de zéro, et la gravité de 17 000 \$ à 6 100 \$. Les données relatives à la fréquence et à la gravité des sinistres sont généralement concordantes.

Les résultats varient considérablement en fonction de l'aléa éolien local. Parmi les 680 lieux considérés ici, le rapport coûts-avantages varie de presque 0 à plus de 100. Le rapport moyen non pondéré (c'est-à-dire en pondérant de la même manière chacune des 680 localités) est de 14:1. Les résultats dépendent aussi fortement du coefficient de pression interne; la variation de ce paramètre parmi ses valeurs possibles peut produire un rapport moyen coûts-avantages pondéré par la population supérieur à 200:1.

Comme toute recherche, cette étude est limitée et soulève des questions importantes. Elle n'examine que les coûts et les avantages des aspects de la norme CSA S520:22 qui résistent au soulèvement. Qu'en est-il des forces latérales? Elle n'applique la méthode qu'à un seul bâtiment moyen qui respecte complètement le code (pour les conditions actuelles) et la norme (pour les conditions hypothétiques). Qu'en est-il des bâtiments plus grands ou plus petits, des bâtiments dont les matériaux de couverture et de bardage sont différents, des bâtiments présentant des défauts de construction et des différences dans la multitude d'autres caractéristiques qui rendent chaque bâtiment unique? Dans mes futures recherches, j'espère au moins examiner les performances de bâtiments de différentes tailles, configurations de toiture et différents défauts de construction tels que l'absence de clous en biais dans les assemblages toit-murs.

6. Références citées

- Applied Technology Council (2012). *Seismic Performance Assessment of Buildings Volume 1 – Methodology FEMA P-58-1*. Federal Emergency Management Agency, Washington DC.
- Boise Cascade (ND). *Weights of Building Materials*, 2 pp. <https://inspectapedia.com/structure/Weights-of-Building-Materials-Boise-Cascade.pdf>
- Cannon, A. J., et coll. 2020 : Bâtiments et infrastructures publiques de base résistants aux changements climatiques 2020 : évaluation des effets des changements climatiques sur les données de conception climatique au Canada. <https://publications.gc.ca/site/fra/9.893023/publication.html>
- Cheng, J. (2004). Testing and analysis of the toe-nailed connection in the residential roof-to-wall system. *Forest Products Journal*, 54(4):58–65
- CSA Group (2022). CSA S520:22, *Design and Construction of Low-Rise Residential and Small Buildings to Resist High Wind*, 83 p.
- Datin, P.L., Prevatt, D.O., et Pang, W. (2011). Wind-uplift capacity of residential wood roof-sheathing panels retrofitted with insulating foam adhesive. *Journal of Architectural Engineering*, 17(4): 144–154, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000034](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000034)
- Engineering Toolbox, The (2012). *Nails and Spikes – Withdrawal Force*. https://www.engineeringtoolbox.com/nails-spikes-withdrawal-load-d_1814.html [consulté le 1^{er} août 2023]
- Environnement et Changement climatique (2023). *Coût social des émissions de gaz à effet de serre*. <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changements-climatiques/recherche-donnees/cout-social-ges.html> [consulté le 9 octobre 2023]
- Gavanski, E., Kopp, G.A., et Hong, H.P. (2014). Reliability analysis of roof sheathing panels on wood-frame houses under wind loads in Canadian cities. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 41(8): 717–727. <https://doi.org/10.1139/cjce-2013-0549>
- Gordian (2023). *Contractor's Pricing Guide: Residential Repair & Remodeling Costs with RSMeans Data*. Greenville SC, 320 p.
- Gray, J. (2022). 2 × 4 Weight by Wood Type & Length • 2 × 4 Weight Chart. Roof Online. <https://roofonline.com/lumber-2x4-weight/>
- Henderson, D., Williams, C., Gavanski, E., and Kopp, G.A. (2013). Failure mechanisms of roof sheathing under fluctuating wind loads. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 114: 27–37, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.01.002>
- Koontz, J.S. (2011). The correlation between wind resistance and physical properties of fiberglass shingles. *Proc. 26th Annual RCI International Convention and Trade Show April 7–12, 2011, Reno NV*, <https://iibec.org/wp-content/uploads/2011-CTS-koontz.pdf> [consulté le 1^{er} août 2023]
- Kopp, G.A., Oh, J.H., et Incelet, D.R. (2008). Wind-induced internal pressure in houses. *Journal of Structural Engineering*, 134(7): 1129–1138, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2008\)134:7\(1129\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:7(1129))
- Lopez, J.M., Roueche, D.B., et Prevatt, D.O. (2020). Wind resistance and fragility functions for wood-framed wall sheathing panels in low-rise residential construction. *Journal of Structural Engineering*, 146(8), 04020139, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002653](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002653)
- Garrett E. Luszczki, G.E., Clapp, J.D., Davids, W.G., et Lopez-Anido, R. (2013). Withdrawal capacity of plain, annular shank, and helical shank nail fasteners in spruce-pine-fir lumber. *Forest Products Journal* 63 (5–6): 213–220, <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-13-00055>
- Insurance Information Institute (2023). *Homeowners Insurance Basics*. <https://www.iii.org/article/homeowners-insurance-basics> [consulté le 9 octobre, 2023]

- Magwood, C., Huynh, T., et Olgay, V. (2023). *The Hidden Climate Impact of Residential Construction*. RMI, Boulder, CO, 36 p., <https://rmi.org/insight/hidden-climate-impact-of-residential-construction/> [consulté le 23 juin 2023]
- Marshall, T., and Herzog, R. (1999). Protocol for assessment of hail-damaged roofing. *Proceedings of the North American Conference on Roofing Technology, August 16–17, 1999, Toronto, Ontario*: 40–46, https://www.researchgate.net/publication/327022554_Protocol_for_Assessment_of_Hail-Damaged_Roofing [consulté le 3 novembre 2021]
- Conseil national de recherches Canada (2020). Code national du bâtiment du Canada 15^e édition. Ottawa, 1530 p. <https://doi.org/10.4224/w324-hv93>
- Northern Tornado Project (2023). *Northern Tornado Project*. <https://ntpopendata-westernu.opendata.arcgis.com/> [consulté le 1^{er} juillet 2023]
- Pacific Climate Impacts Consortium (2023). *Design Value Explorer*. <https://services.pacificclimate.org/dev/dv-explorer/?dv=HDD>
- Performance Panels (2023). Lightness in Weight. <https://www.performancepanels.com/lightness-in-weight>
- Porter, K.A., A.S. Kiremidjian, et J.S. LeGrue, 2001. Assembly-based vulnerability of buildings and its use in performance evaluation. *Earthquake Spectra* 17 (2): 291–312, <http://www.sparisk.com/pubs/Porter-2001-ABV.pdf>
- Porter K., et Cho, I. (2013). Characterizing a building class via key features and index buildings for class-level vulnerability functions. Deodatis, Ellingwood and Frangopol (Eds), *Safety, Reliability, Risk and Life-Cycle Performance of Structures & Infrastructures*. Taylor & Francis Group, London, 533–540, <http://www.crcnetbase.com/doi/pdf/10.1201/b16387-79>
- Porter, K.A., Scawthorn, C.R., and Sandink, D. (2021). *An Impact Analysis for the National Guide for Wildland-Urban Interface Fires*. Prepared for the National Research Council of Canada. Institute for Catastrophic Loss Reduction, Toronto, ON, 136 p. <https://doi.org/10.25810/rxtc-3p87>
- Prevatt, D.O., P.L. Datin et A. Mensah (2009). Performance Based Wind Engineering (PBWE): interaction of hurricanes with residential structures. *Proc 2009 NSF Engineering Research and Innovation Conference, Honolulu, Hawaii*. http://www.davidoprevatt.com/wp-content/uploads/2009/05/datin_david_pbwe.pdf [consulté le 20 mars 2011].
- Ramsdell, J.V., Rishel, J.P., et Buslik, A.J. (2007). Tornado climatology of the contiguous United States. Nuclear Regulatory Commission Rep. NUREG/CR-4461, Rev. 2, 246 pp, www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr4461/cr4461-r2.pdf
- Ratesdotca (2023). Additional Living Expenses. <https://rates.ca/guides/home-insurance/additional-living-expenses-coverage>
- Red Head (ND). *Selection Guide Anchors for Concrete Applications*. https://www.itwredhead.com/Portals/0/Documents/Catalog/61-101_Mechanical_Anchoring_Systems_Section.pdf
- Risk Management Solutions (2012). *Principles of Model Validation: United States Hurricane Model*. Newark, CA, 28 p.
- Roof Hub (2022). How Much Does a Bundle of Shingles Weigh? <https://myroofhub.com/materials/bundle-shingles-weight-dumpster-ordering/> [consulté le 1^{er} juillet 2023]
- Simpson Strong Tie (2023a). *Rafter / Truss / Plate Fastening*. <https://ssttoolbox.widen.net/view/pdf/gnmsijts3f/C-F-2023TECHSUP-p082-102.pdf>

- Simpson Strong Tie (2023 b). *LSTA Light Strap Tie*. https://www.strongtie.com/lateralconnectorstiesandstraps_coldformedsteelconstruction/lsta_strap/p/lsta [consulté le 1^{er} août 2023]
- Smith, D.A., Mehta, K.C., Yeatts, B.B., et Bhavaraju, S.V. (1994). Area-averaged and internal pressure coefficients measured in the field. *Journal of Wind Engineering*, 53(1–2): 89–103, [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(94\)90020-5](https://doi.org/10.1016/0167-6105(94)90020-5)
- Vickery, P.J., Skerlj, P.F., Lin, J., Twisdale Jr, L.A., Young, M.A., and Lavelle, F.M. (2006). HAZUS-MH hurricane model methodology. II: Damage and loss estimation. *Natural Hazards Review*, 7(2): 94–103. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1527-6988\(2006\)7:2\(94\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1527-6988(2006)7:2(94))
- Xactware (2023). *Xactimate*. <https://xactimate.com/xor/sign-in>

Annexe A. Essais d'assemblage toit-mur

A.1 Spécimens d'essai

Les spécimens sont constitués de deux longueurs de 12 pouces de SPF 2 x 4 pour représenter la plaque supérieure et d'une longueur de 9 pouces pour représenter le cordon inférieur de la ferme de toit. Les éléments de la plaque supérieure sont reliés sur leur face large par deux clous motorisés de 2,5 pouces, chacun à environ 2 pouces de chaque extrémité. Le cordon inférieur est cloué sur son bord étroit, perpendiculairement au 2 x 4 supérieur de la plaque supérieure, avec trois clous motorisés de 3,25 pouces, un d'un côté et deux de l'autre. Les échantillons munis d'une vis de ferme sont reliés par une vis enfoncée à un angle de moins de 20 degrés par rapport à la verticale.

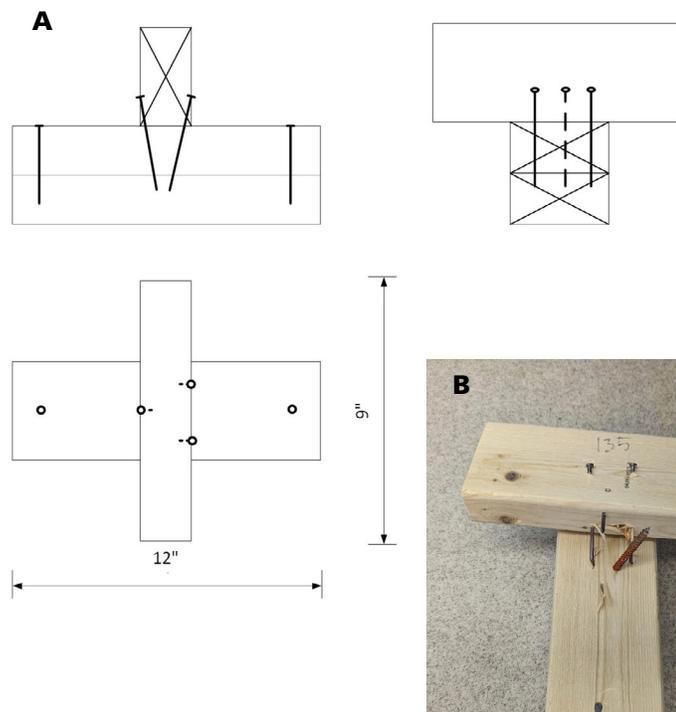
A.2 Appareil d'essai

L'appareil d'essai se compose d'un palan à moteur de 2 tonnes avec une section de canal boulonnée en travers de ses jambes pour fournir un point d'ancrage par le bas, comme le montre la Figure 13. L'échantillon est soutenu par le haut et le bas par quatre sangles : une à chaque extrémité de la poutrelle et une à chaque extrémité de la plaque supérieure. Une cellule de charge mesure la tension en kg. La figure 14 montre les échantillons testés.

Figure 13. Appareil de test



Figure 14. Spécimen d'essai (A) à clous en biais seulement, et (B) un échantillon avec une vis de ferme, après l'essai.



A.3 Protocole de chargement

On ajoute de la charge en pompant l'élévateur hydraulique du palan du moteur. Le pompage ajoute de l'ordre de 0,1 kN par course. À raison d'une course toutes les deux secondes, une charge de 1 kN est obtenue en 20 secondes environ. On charge l'échantillon jusqu'à la rupture de l'assemblage et on enregistre la charge maximale observée sur l'écran.

A.4 Analyse des résultats

On trie les spécimens par capacité croissante et on ajuste une fonction de distribution cumulative log-normale aux résultats, avec pour objectif de réduire la différence maximale entre la fonction de distribution cumulative observée et la fonction paramétrique. Un ajustement satisfaisant répond au test d'adéquation de Lilliefors au niveau de signification de 5 %.

A.5 Résultats

Voir le Tableau 10 pour les résultats des essais individuels. Dans le tableau, ID désigne l'identifiant d'un spécimen et R la charge à la rupture de l'assemblage. Le tableau 11 résume les paramètres de la fonction de distribution cumulative log-normale la mieux ajustée. Dans ce tableau, N représente le nombre d'échantillons testés, θ représente la capacité médiane en kN et β représente l'écart type du logarithme naturel de la capacité. La Figure 15 montre les courbes d'ajustement.

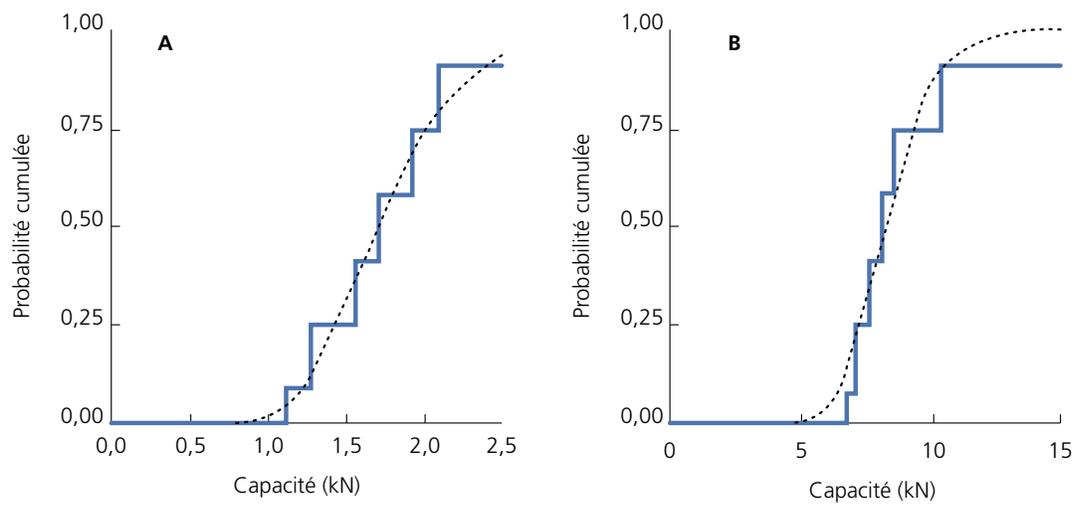
Tableau 10. Essais de traction de l'assemblage toit-mur

ID	Vis de ferme	R, kN	Mode de défaillance
30	non	1,56	extraction de 3 clous
31	non	1,28	extraction de 3 clous
32	non	1,92	extraction de 3 clous
33	non	1,11	extraction de 3 clous
34	non	2,09	extraction de 3 clous
35	non	1,70	extraction de 3 clous
130	oui	10,30	extraction de 2 clous, enfoncement d'un clou, extraction d'une vis de ferme
131	oui	6,77	extraction de 3 clous et d'une vis de ferme
132	oui	8,53	extraction de 3 clous et passage d'une vis de ferme
133	oui	7,63	extraction de 3 clous et d'une vis de ferme
134	oui	8,05	extraction de 3 clous et d'une vis de ferme
135	oui	7,15	extraction de 3 clous et d'une vis de ferme

Tableau 11. Résumé des résultats

Assemblages	N	θ , kN	β	Test de Lilliefors
Trois clous en biais de 3,25 pouces	6	1,70	0,25	Réussite
Idem plus vis de ferme de 6 pouces	6	8,16	0,18	Réussite

Figure 15. Capacité d'assemblage entre le toit et le mur (A) assemblage par clouage en biais, (B) idem plus une vis de ferme de 6 pouces.





Institute for Catastrophic Loss Reduction
Institut de prévention des sinistres catastrophiques

Bureau de Toronto
30-34 Duncan Street
Toronto (Ontario) Canada
M5V 2C3
Tél. 416-364-8677

Bureau de London
Université Western
Amit Chakma Building
Bureau 4405
1151 Richmond Street
London (Ontario) Canada
N6A 5B9
Tél. 519-661-3234
Télééc. 519-661-4273

@ info@iclr.org

www.iclr.org

www.hail-smart.com

www.PIEVC.ca

facebook.com/instituteforcatastrophiclossreduction

twitter.com/iclrcanada • twitter.com/citiesadapt

youtube.com/iclrinfo

Rechercher : Institute for Catastrophic Loss Reduction (ICLR)

www.basementfloodreduction.com

www.reduirelesinondationsdesous-sol.com

www.backwatervalveinstallation.com

