

Résistance des garde-corps en bois fixés sur des structures neuves et comportement sous charges de garde-corps métalliques fixés sur des structures existantes

Bertrand Galy
André Lan

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

R-1048



NOS RECHERCHES travaillent pour vous !

Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

Mission

Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes;

Assurer la diffusion des connaissances et jouer un rôle de référence scientifique et d'expertise;

Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail.

Pour en savoir plus

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour. De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement. www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement :

- au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CNESST (preventionautravail.com)
- au bulletin électronique [InfoIRSST](#)

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec
2019
ISBN : 978-2-89797-054-3
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications
et de la valorisation de la recherche
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
mai 2019

Résistance des garde-corps en bois fixés sur des structures neuves et comportement sous charges de garde-corps métalliques fixés sur des structures existantes

Bertrand Galy, André Lan

IRSST

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

R-1048



Avis de non-responsabilité

L'IRSST ne donne aucune garantie relative à l'exactitude, la fiabilité ou le caractère exhaustif de l'information contenue dans ce document. En aucun cas l'IRSST ne saurait être tenu responsable pour tout dommage corporel, moral ou matériel résultant de l'utilisation de cette information.

Notez que les contenus des documents sont protégés par les législations canadiennes applicables en matière de propriété intellectuelle.

Cette publication est disponible en version PDF sur le site Web de l'IRSST.



ÉVALUATION PAR DES PAIRS

Conformément aux politiques de l'IRSST, les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

REMERCIEMENTS

La réalisation de cette étude a été rendue possible grâce à la collaboration et à l'appui de plusieurs organismes, collaborateurs, et spécialistes œuvrant dans le domaine de la construction et de la santé et sécurité du travail. Nous tenons particulièrement à remercier les organisations et les personnes suivantes :

- Pierre Drouin et Thiery Akilimali, Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST), pour leur contribution à la réalisation des essais;
- Pierre-Luc Labelle, Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST);
- Pierre-Luc Leclair, Association des professionnels de la construction et de l'habitation du Québec (APCHQ);
- Yohann Aubé, Association des maîtres couvreurs du Québec (AMCQ);
- Simon Lévesque, Fédération des travailleurs et travailleuses du Québec (FTQ-Construction);
- Bertrand Gauthier, Confédération des syndicats nationaux (CSN-Construction);
- Martin Lemieux, Syndicat québécois de la construction (SQC);
- Louise Lessard, Association paritaire pour la santé et la sécurité du travail du secteur de la construction (ASP Construction).

SOMMAIRE

Malgré les réglementations nationales et internationales qui exigent de protéger les travailleurs exposés à un risque de chute, les chutes de hauteur restent l'une des principales causes de décès pour les travailleurs de la construction. Elles sont la deuxième cause d'accidents en ce qui a trait aux coûts (397 millions de dollars par an sur la période 2010-2012) et représentent 16,1 % des décès au travail en 2017. Les garde-corps temporaires sont un moyen efficace de protection contre les chutes de hauteur, par ailleurs, s'agissant d'un moyen de protection passif, ils permettent de maintenir une productivité élevée. La conception des montants et lisses des garde-corps temporaires métalliques ne pose pas de difficulté majeure et a notamment été étudiée lors d'un projet précédent de l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) (Lan et Daigle, 2011). Cependant, la résistance d'un système de garde-corps repose en partie sur leur fixation à la structure d'accueil. L'embase des garde-corps est généralement clouée ou vissée à la structure d'accueil. En ce qui concerne les garde-corps en bois installés sur des solives ajourées ou murs préfabriqués (lors de la construction du bâtiment), aucune étude n'a été menée à ce jour, il est donc difficile de s'assurer de leur résistance aux charges prescrites par le Code de sécurité pour les travaux de construction (CSTC) en vigueur au Québec. Pour les garde-corps métalliques généralement utilisés pour les travaux d'étanchéité sur des bâtiments existants, la résistance dépendra du fond de vissage, qui est souvent inconnu de l'entrepreneur. Il est possible d'effectuer une estimation de la résistance des garde-corps métalliques en se basant sur des formules empiriques caractérisant la résistance à l'arrachement des vis. Cependant, la variabilité de la résistance à l'arrachement établie selon ces formules empiriques peut être importante. De plus, les conditions du bois *in situ* sont la plupart du temps inconnues (type de bois, humidité, pourrissement, présence de nœuds). Ainsi, la résistance de la fixation de garde-corps sur des structures réelles est très souvent approximative. Les objectifs des travaux de recherche sont (i) de vérifier la résistance des garde-corps en bois fixés sur des structures neuves reconstituées en laboratoire, de type solives ajourées, (ii) de vérifier la résistance des garde-corps en bois fixés sur mur préfabriqué reconstitué en laboratoire, (iii) de comparer le comportement sous charges de garde-corps métalliques installés sur des toits plats de structures existantes de différents âges.

Lors de cette étude, 262 essais de résistance sur des garde-corps en bois construits à partir de 2 po x 4 po et fixés sur des solives ajourées ont été réalisés en laboratoire. Ces essais ont permis d'analyser l'influence des variables suivantes : hauteur du garde-corps (1 m ou 1,2 m), hauteur de la solive (9,5 po, 12 po, 14 po, 16 po), configuration d'essai (1 travée, 3 travées, 2 travées avec force appliquée directement sur le montant), et types de fixation (à l'aide de clous lisses, clous annelés, clous vrillés, vis à bois, tirefonds). L'influence de ces paramètres a aussi été étudiée en laboratoire lors de 98 essais de résistance pour des garde-corps en bois fixés sur un mur préfabriqué construit à partir de 2 po x 4 po. Au cours de ces essais sur solives ajourées et sur mur préfabriqué, la force horizontale était appliquée sur la lisse supérieure du garde-corps à l'aide d'un treuil manuel et mesurée à l'aide d'une cellule de charge et d'un système d'acquisition des données avec une fréquence de 10 Hz. La charge verticale était un poids mort appliqué sur la lisse supérieure du garde-corps. Enfin, 36 essais ont été réalisés sur le terrain avec des garde-corps métalliques installés sur des structures réelles : deux bâtiments (l'un de 2008 et l'autre de 2013), et quatre parapets différents (dimensions et construction différentes), tous en bon état avant les essais (taux d'humidité inférieur à 10 % et absence de dommage apparent). Trois modèles de garde-corps métalliques ont été mis à l'essai, dont deux avaient déjà fait l'objet d'une étude précédente en laboratoire. Pour ces garde-corps, plusieurs

moyens de fixation sur les parapets ont été étudiés : fixation sur une face ou deux faces (avec serre-parapet ou plaque stabilisatrice), différents types de vis (vis noire, vis autotaraudeuse et tirefonds).

Les résultats des essais en laboratoire montrent que les résistances obtenues sont plus grandes pour des garde-corps de 1 m de hauteur et que la configuration d'essai la plus critique est celle où la force est appliquée directement sur le montant. Ces deux résultats étaient anticipés. De manière générale, les résistances obtenues sont plus importantes pour les solives de plus grandes dimensions alors que la hauteur de fixation ne semble pas avoir d'influence notable pour le mur préfabriqué. Dans ce dernier cas, les résultats observés sont probablement dus à la faible profondeur du fond de clouage (moins d'un pouce). Enfin, les résultats montrent que certains types de fixation offrent de meilleures résistances : lorsque le montant travaille sur son axe fort (ce qui n'est pas toujours évident à mettre en pratique en réalité), lorsque l'on utilise des vis à bois ou des tirefonds, ou lorsque l'on a recours à une équerre métallique en conjonction avec des clous lisses pour renforcer la fixation du montant à la structure d'accueil.

Les résultats des essais sur le terrain montrent une certaine influence du type de vis utilisé pour ancrer les bases des garde-corps, mais le nombre de vis utilisé au total demeure le paramètre le plus important. Il est primordial de respecter les instructions du fabricant en ce qui a trait au nombre de vis à mettre en place. Aucun des essais avec une fixation sur une seule face du parapet n'a permis d'atteindre la résistance exigée par le CSTC. Pour des parapets de petites dimensions composés d'un panneau d'isolant qui dépasse du niveau de la toiture (ce qui représente le cas le plus critique), lorsque la fixation du montant fait appel à deux faces, les résistances obtenues permettent d'atteindre les exigences du CSTC. Certains types de garde-corps sont difficilement installables sur des parapets de petites dimensions, en conséquence, il est souhaitable de choisir un modèle de garde-corps avec des embases de fixations modulaires, permettant de s'adapter au plus grand nombre de situations possible.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	I
SOMMAIRE	III
LISTE DES TABLEAUX	IX
LISTE DES FIGURES.....	XI
LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XV
1. INTRODUCTION	1
2. PROBLÉMATIQUE DE SANTÉ ET DE SÉCURITÉ DU TRAVAIL	3
2.1 Chutes de hauteur et utilisation des garde-corps temporaires.....	3
2.1.1 Chutes de hauteur	3
2.1.2 Protection contre les chutes à l'aide d'un garde-corps.....	3
2.2 Conception des garde-corps	5
2.2.1 Exigences du CSTC	5
2.2.2 Fixation des montants à la structure d'accueil	6
2.3 Résistance à l'arrachement des vis.....	8
3. OBJECTIFS DE RECHERCHE.....	11
4. MÉTHODOLOGIE.....	13
4.1 Essais en laboratoire : garde-corps en bois fixés sur des solives et un mur préfabriqué	13
4.1.1 Laboratoire d'essais	13
4.1.2 Charge horizontale	15
4.1.3 Charge verticale	16
4.1.4 Solives.....	17
4.1.5 Mur préfabriqué	19
4.1.6 Nomenclature de fixation	20
4.1.7 Configurations d'essais.....	28
4.1.8 Matrice d'essai pour les solives	28
4.1.9 Matrice d'essai pour le mur préfabriqué.....	30
4.2 Essais de terrain : garde-corps métalliques fixés sur des parapets de bâtiments existants	31
4.2.1 Fixation des garde-corps	31
4.2.2 Parapets.....	33
4.2.3 Garde-corps à l'étude	37
4.2.4 Application de la force sur les garde-corps	41

5.	RÉSULTATS DES ESSAIS RÉALISÉS EN LABORATOIRE ET DISCUSSION	45
5.1	Garde-corps en bois fixés sur des solives ajourées	45
5.1.1	Exemple de résultats d'essais	45
5.1.2	Analyse statistique.....	46
5.1.3	Influence de la configuration du garde-corps	48
5.1.4	Influence de la hauteur du garde-corps	52
5.1.5	Influence de la hauteur des solives.....	54
5.1.6	Influence du type de fixation	57
5.2	Garde-corps en bois fixés sur un mur préfabriqué	64
5.2.1	Exemple de résultats d'essais	64
5.2.2	Fond de clouage.....	65
5.2.3	Analyse statistique.....	66
5.2.4	Influence de la configuration du garde-corps	69
5.2.5	Influence de la hauteur de fixation	70
5.2.6	Influence du type de fixation	72
6.	RÉSULTATS DES ESSAIS SUR LES GARDE-CORPS MÉTALLIQUES ET DISCUSSION	77
6.1	Résultats d'essais.....	77
6.2	Influence de l'âge de la bâtisse, de l'état et du type de parapet	80
6.2.1	Parapet 1.....	80
6.2.2	Parapet 2.....	80
6.2.3	Parapet 3.....	81
6.2.4	Parapet 4.....	81
6.3	Influence du type de vis	82
6.3.1	Parapet 1.....	82
6.3.2	Parapet 4.....	82
6.4	Influence du type de fixation des montants	84
6.5	Comportement sous charge.....	84
7.	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	85
7.1	Garde-corps en bois installés sur des solives ajourées.....	85
7.2	Garde-corps en bois installés sur des murs préfabriqués.....	86
7.3	Garde-corps métalliques installés sur des parapets.....	87
7.4	Recommandations pour de futures études.....	88
	BIBLIOGRAPHIE	91
	ANNEXE A : RÉSULTATS D'ESSAIS DE LABORATOIRE POUR LES SOLIVES.....	93
	ANNEXE B : RÉSULTATS D'ESSAIS EN LABORATOIRE POUR LE MUR PRÉBABIQUÉ.....	103

ANNEXE C : DIMENSIONS DU MUR PRÉFABRIQUÉ109

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Types de clous utilisés	21
Tableau 2.	Types de vis utilisées	21
Tableau 3.	Configuration d'essais pour les solives ajourées et le mur préfabriqué	28
Tableau 4.	Facteurs et niveaux considérés pour les solives	28
Tableau 5.	Matrice d'essais pour les solives ajourées	29
Tableau 6.	Facteurs et niveaux considérés pour le mur préfabriqué	30
Tableau 7.	Matrice des essais sur le mur préfabriqué.....	30
Tableau 8.	ANOVA pour les essais sur les solives	47
Tableau 9.	Test des effets pour les essais sur les solives.....	47
Tableau 10.	Ajustement du modèle	48
Tableau 11.	Mode de défaillance observé en fonction de la configuration d'essai	52
Tableau 12.	Mode de défaillance observé en fonction de la hauteur du garde-corps.....	53
Tableau 13.	Taux d'échec des essais en fonction de la hauteur des solives.....	54
Tableau 14.	Mode de défaillance en fonction de la hauteur des solives.....	54
Tableau 15.	Calcul des moments fléchissants à la base du montant et de la résistance à l'arrachement demandée aux vis ou clous	55
Tableau 16.	Taux d'échec en fonction du type de fixation, pour la configuration 1T.....	57
Tableau 17.	Mode de défaillance observé en fonction du type de fixation	57
Tableau 18.	Taux d'échec en fonction du type de fixation, pour la configuration 2T-M	60
Tableau 19.	Synthèse des résultats par type de fixation et par hauteur de solive pour la configuration 1T	61
Tableau 20.	Synthèse des résultats par type de fixation et par hauteur de solive pour la configuration 2T-M.....	63
Tableau 21.	Fond de clouage / vissage dans le mur préfabriqué	66
Tableau 22.	ANOVA pour les essais sur le mur préfabriqué	66
Tableau 23.	Test des effets pour les essais sur le mur préfabriqué	67
Tableau 24.	Ajustement du modèle	68
Tableau 25.	Mode de défaillance en fonction de la configuration d'essai.....	70
Tableau 26.	Mode de défaillance en fonction de la hauteur de fixation	70
Tableau 27.	Mode de défaillance en fonction du type de fixation	73
Tableau 28.	Synthèse des résultats par type de fixation pour la configuration d'essais critique (2T-M)	74
Tableau 29.	Synthèse des résultats par type de fixation pour la configuration 1T	75

Tableau 30.	Résultats des essais réalisés avec les garde-corps métalliques sur le bâtiment de 2013	78
Tableau 31.	Résultats des essais réalisés avec les garde-corps métalliques sur le bâtiment de 2008	79
Tableau 32.	Résistances et mode de défaillance observés pour trois travées du garde-corps 1	82
Tableau 33.	Résistances et mode de défaillance observés sur le parapet 4	83
Tableau 34.	Combinaisons de garde-corps et fixation des montants	84
Tableau 35.	Résultats des essais réalisés sur les solives de 9,5 po	93
Tableau 36.	Résultats des essais réalisés sur les solives de 12 po	95
Tableau 37.	Résultats des essais réalisés sur les solives de 14 po	98
Tableau 38.	Résultats des essais réalisés sur les solives de 16 po	100
Tableau 39.	Résultats des essais réalisés avec une hauteur de fixation de 12 po	104
Tableau 40.	Résultats des essais réalisés avec une hauteur de fixation de 16 po	105
Tableau 41.	Résultats des essais réalisés avec une hauteur de fixation de 24 po	106

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Éléments de garde-corps temporaire métallique.	4
Figure 2.	Garde-corps temporaire en bois (apparaît non conforme au CSTC).	4
Figure 3.	Garde-corps temporaire en bois installé sur des solives ajourées.	7
Figure 4.	Structure de mur préfabriqué en 2 po x 4 po.	8
Figure 5.	Comparaison des résistances à l'arrachement pour différents calibres de vis.	9
Figure 6.	Aménagement du laboratoire pour les essais sur les solives.	13
Figure 7.	Aménagement du laboratoire pour les essais sur le mur préfabriqué.	14
Figure 8.	Treuil mécanique, longe et cellule de charge.	15
Figure 9.	Support de treuil.	16
Figure 10.	Dispositif permettant l'application de la charge verticale.	17
Figure 11.	Vue de face d'une solive ajourée.	18
Figure 12.	Extrémité en 2 po x 3 po et extrémité en OSB 0,5 po pour une solive ajourée.	18
Figure 13.	Coupe de mur préfabriqué en 2 po x 4 po.	19
Figure 14.	Essai de traction sur le mur préfabriqué.	20
Figure 15.	Résultats de l'essai de traction sur le mur préfabriqué.	20
Figure 16.	Fixation CA21.	21
Figure 17.	Fixation CA31 pour une solive (a), clou central décalé afin d'éviter l'OSB (b), et fixation CA31 pour le mur préfabriqué (c).	22
Figure 18.	Fixation CA33.	22
Figure 19.	Fixation CL22 – AF.	23
Figure 20.	Fixation CL33 – AF.	23
Figure 21.	Fixation CL31 pour les solives (a) et pour le mur préfabriqué (b).	24
Figure 22.	Fixation CL31 – E.	24
Figure 23.	Fixation CV33.	25
Figure 24.	Fixation CV231.	25
Figure 25.	Fixation VB21 pour les solives (a) et pour le mur préfabriqué (b).	26
Figure 26.	Fixation VB22.	26
Figure 27.	Fixation T11 pour les solives (a) et pour le mur préfabriqué (b).	27
Figure 28.	Garde-corps fixé à l'aide de la fixation VB21 et avec une hauteur de fixation de 12 po.	31

Figure 29.	Garde-corps installé sur le mur préfabriqué, fixation CL31 et configuration 3T-C, avec espacement des clous de 24 po.	31
Figure 30.	Vis noire.....	32
Figure 31.	Vis autotaraudeuse.....	32
Figure 32.	Tirefonds.....	33
Figure 33.	Parapet 1.....	33
Figure 34.	Parapet 2 avec garde-corps 3.....	34
Figure 35.	Coupe exploratoire et mesure d'humidité à proximité du parapet 2.....	35
Figure 36.	Coupe exploratoire et mesure d'humidité du parapet 3.....	35
Figure 37.	Parapet 3 après réparation avec membrane d'étanchéité.....	36
Figure 38.	Hauteur variable du parapet 4 due à la pente de la toiture.....	37
Figure 39.	Coupe exploratoire et mesure d'humidité à proximité du parapet 4.....	37
Figure 40.	Garde-corps 1 testé sur le terrain, (a) fixation en façade du parapet (4 vis), (b) avec le serre-parapet.....	38
Figure 41.	Garde-corps 1 testé sur le terrain, fixation sur la face horizontale du parapet avec 6 vis.....	39
Figure 42.	Garde-corps 2 avec stabilisateur de poteau en L.....	39
Figure 43.	Garde-corps 2 avec stabilisateur de poteau de type plaque métallique.....	40
Figure 44.	Garde-corps 3 avec plaque de stabilisation, pied de fixation et serre-parapet.....	40
Figure 45.	Garde-corps 3 installé sur le parapet 4.....	41
Figure 46.	Application de la force sur le garde-corps <i>in situ</i>	42
Figure 47.	Système d'application de la charge sur le garde-corps.....	43
Figure 48.	Résultats des essais 79 à 81.....	45
Figure 49.	Diagramme d'interaction.....	46
Figure 50.	Distribution des résidus en fonction de la force horizontale prévue (a) et du numéro de ligne (numéro d'essai) (b).....	47
Figure 51.	Vérification des quantiles normaux des résidus.....	48
Figure 52.	Force horizontale en fonction de la configuration d'essai, pour la fixation CL31.....	49
Figure 53.	Force horizontale en fonction de la configuration d'essai, pour la fixation CA31.....	50
Figure 54.	Force horizontale en fonction de la configuration d'essai et du type de fixation, pour différentes hauteurs de solives.....	51
Figure 55.	Force horizontale en fonction de la hauteur du garde-corps et de celle de la solive.....	53

Figure 56.	Force horizontale maximale en fonction de la hauteur de la solive et du type de fixation.....	56
Figure 57.	Force horizontale maximale en fonction du type de fixation, pour la configuration 1T, solives de 9,5 et 12 po.....	58
Figure 58.	Force horizontale maximale en fonction du type de fixation, pour la configuration 1T, solives de 14 et 16 po.....	59
Figure 59.	Force horizontale maximale en fonction du type de fixation, pour la configuration 2T-M.....	60
Figure 60.	Force horizontale moyenne moins deux écart-type, en fonction du type de fixation, pour la configuration 1T.....	62
Figure 61.	Force horizontale moyenne moins deux écarts-types, en fonction du type de fixation, pour la configuration 2T-M.....	64
Figure 62.	Résultats des essais 23 à 25.....	65
Figure 63.	Profondeur de pénétration pour un clou / une vis de 3,5 po.....	66
Figure 64.	Distribution des résidus en fonction de la force horizontale prévue (a) et du numéro de ligne (numéro d'essai) (b).....	67
Figure 65.	Vérification des quantiles normaux des résidus.....	68
Figure 66.	Force horizontale maximale pour trois configurations d'essai et des hauteurs de fixation de 12 et 24 po.....	69
Figure 67.	Force horizontale maximale pour deux configurations d'essai, 5 modes de fixation et une hauteur de fixation de 12 po.....	69
Figure 68.	Force horizontale maximale en fonction de la hauteur de fixation.....	71
Figure 69.	Force horizontale maximale en fonction du type de fixation et de la configuration d'essai, hauteur de fixation 24 po.....	72
Figure 70.	Force horizontale maximale en fonction du type de fixation et de la configuration d'essai, hauteur de fixation 16 po.....	72
Figure 71.	Force horizontale moyenne moins deux écarts-types, en fonction du type de fixation, pour la configuration 2T-M.....	74
Figure 72.	Force horizontale moyenne moins deux écart-type, en fonction du type de fixation, pour la configuration 1T.....	75
Figure 73.	Vue de face du mur préfabriqué.....	109
Figure 74.	coupe A – A.....	109
Figure 75.	Coupe B – B.....	110
Figure 76.	Contreventements du mur préfabriqué.....	110
Figure 77.	Dimensions du système en angle de la force oblique appliquée sur les garde-corps.....	111

LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AF :	Axe fort
ANOVA :	Analyse de variance
CA :	Clou annelé
CL :	Clou lisse
CNESST :	Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail
COV :	Coefficient de variation
CSTC :	Code de sécurité pour les travaux de construction
CV :	Clou vrillé
ÉPI :	Équipements de protection individuels
HSS :	<i>Hollow structural section</i>
IRSST :	Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail
OSB :	<i>Oriented strand board</i>
SPF :	<i>Spruce, pine, fir</i>
T :	Tirefond
VB :	Vis à bois

1. INTRODUCTION

Parmi les professions les plus touchées par les chutes de hauteur, on compte les travailleurs de la construction. En 2017, dix travailleurs sont morts des suites d'une chute de hauteur, ce qui représente la troisième cause de mortalité pour l'année de référence (CNESST, 2018). Les chutes au niveau inférieur représentent environ 4 000 lésions professionnelles par an (Duguay, Boucher, Prud'homme, Busque, et Lebeau, 2017). Elles sont également la deuxième cause d'accidents en ce qui a trait aux coûts par année (397 M\$).

La stratégie de protection contre les chutes de hauteur consiste, dans un premier temps, à éliminer les risques à la source du danger : dans la mesure du possible il faut éviter les travaux en hauteur. Si cela est impossible, il faut d'abord penser à mettre en place des protections collectives (garde-corps, filets). Enfin, en dernier recours, des équipements de protection individuels (ÉPI) sont fournis aux travailleurs (Branchtein, 2013; CSTC, 2018). Les garde-corps, temporaires ou permanents doivent être privilégiés aux ÉPI lorsque cela est possible : outre une sécurité accrue, ils offrent un meilleur confort aux travailleurs en les dispensant de porter un ÉPI et, conséquemment, ils engendrent une plus grande productivité.

Les garde-corps temporaires doivent répondre aux exigences du Code de sécurité pour les travaux de construction (CSTC, 2018) en vigueur au Québec et peuvent être classés en trois catégories : garde-corps métallique, garde-corps en bois (garde-corps réalisés à pied d'œuvre) ou garde-corps en câble d'acier. Ces garde-corps doivent tous être en mesure de résister à deux charges statiques simultanées, appliquées sur la lisse supérieure : 450 N verticalement et 900 N horizontalement. En chantier, on rencontre principalement des garde-corps métalliques et en bois, et plus rarement des garde-corps en câble d'acier.

La résistance des montants et lisses des garde-corps est un problème classique de résistance des matériaux, et ne pose pas de grandes difficultés d'analyse ou de conception. Mais la résistance du système de garde-corps va également dépendre de la fixation des montants à la structure d'accueil lors de leur installation. La question de la fixation ayant été relativement peu étudiée, cette activité de recherche vise à :

- Vérifier la résistance des garde-corps en bois fixés sur une structure neuve, composée de solives ajourées et reconstituée en laboratoire;
- Vérifier la résistance des garde-corps en bois fixés sur un mur préfabriqué reconstitué en laboratoire;
- Comparer le comportement sous charges de garde-corps métalliques installés sur des toits plats de structures existantes de différents âges.

Le rapport de recherche présente, dans un premier temps, la problématique de santé et de sécurité du travail, et revient notamment sur les problématiques spécifiquement liées à l'utilisation de garde-corps temporaires sur les chantiers de construction. Par la suite, les objectifs de recherche sont énumérés. Le quatrième chapitre présente la méthodologie de recherche employée, pour vérifier la résistance des systèmes de garde-corps en bois en laboratoire et sur des structures réelles. Les chapitres 5 et 6 présentent les résultats de recherche. Le chapitre 5 se concentre sur les résultats obtenus en laboratoire pour des garde-corps en bois installés sur des structures en solives ajourées ou sur un mur préfabriqué. Le chapitre 6 expose les résultats obtenus pour les garde-corps métalliques installés sur des

structures réelles, d'âge différent, et sur différents parapets. Enfin, des conclusions et recommandations sont formulées.

2. PROBLÉMATIQUE DE SANTÉ ET DE SÉCURITÉ DU TRAVAIL

2.1 Chutes de hauteur et utilisation des garde-corps temporaires

2.1.1 Chutes de hauteur

Parmi les professions les plus touchées par les chutes de hauteur, on compte les travailleurs de la construction. En 2017, dix travailleurs sont morts des suites d'une chute de hauteur, ce qui représente la troisième cause de mortalité pour l'année de référence (CNESST, 2018). Par ailleurs, entre 2009 et 2011, 70 % des arrêts de travaux et 58 % des constats d'infraction dans le milieu de la construction sont liés aux chutes de hauteur (Sabourin, 2011). Celles-ci (« chutes au niveau inférieur » dans la nomenclature de la CNESST) sont parmi les 10 premières causes de lésions professionnelles pour la période 2010-2012, avec une durée d'arrêt de travail moyenne de 142 jours, et représentent environ 4 000 lésions professionnelles par an (Duguay *et al.*, 2017). Elles sont également la deuxième cause d'accidents en ce qui a trait aux coûts par année (397 M\$ pour la période 2010-2012) derrière l'exposition au bruit (777 M\$) (Duguay *et al.*, 2017).

La stratégie de protection contre les chutes de hauteur consiste, dans un premier temps, à éliminer les risques à la source du danger : dans la mesure du possible, il faut éviter les travaux en hauteur. Si cela est impossible, il faut d'abord penser à mettre en place des protections collectives (garde-corps, filets). Enfin, en dernier recours, des équipements de protection individuels (ÉPI) sont fournis aux travailleurs (Branchtein, 2013; CSTC, 2018). Les statistiques de la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST) ne permettent cependant pas de savoir qu'elle est à la cause exacte de la chute : absence de moyens de protection, rupture du garde-corps, etc. Il a cependant été mentionné par un inspecteur qu'une chute non mortelle à la suite d'une rupture de l'ancrage d'un garde-corps est survenue au printemps 2016 à Montréal. Par ailleurs, une alerte a été émise au cours de l'automne 2015 par le ministère du Travail ontarien, relativement à des garde-corps non sécuritaires identifiés sur certains chantiers (MOL, 2015).

2.1.2 Protection contre les chutes à l'aide d'un garde-corps

Les garde-corps temporaires ou permanents consistent en un système passif de protection contre les chutes de hauteur, c'est-à-dire qui ne nécessite pas d'action de la part du travailleur, par opposition aux systèmes actifs, comme les ÉPI qui requièrent un effort de la part du travailleur : s'attacher à l'ancrage lorsqu'il est à son poste de travail. En ce sens, ils doivent être privilégiés aux ÉPI lorsque cela est possible : outre une sécurité accrue, ils offrent un meilleur confort aux travailleurs, permettent une meilleure mobilité, dispensent de porter un ÉPI et, conséquemment, engendrent donc une plus grande productivité.

Les garde-corps permanents sont couverts par le Code national du bâtiment du Canada (CNBC, 2015), alors que les garde-corps temporaires doivent répondre aux exigences du Code de sécurité pour les travaux de construction (CSTC, 2018). Cette activité de recherche ne s'intéresse qu'aux garde-corps temporaires, puisque les garde-corps permanents sont conçus par des ingénieurs lors de la phase de conception du bâtiment.

Les garde-corps temporaires peuvent être classés en trois catégories : garde-corps métallique (Figure 1), garde-corps en bois (garde-corps réalisés à pied d'œuvre) (Figure 2) ou garde-corps en câble d'acier. Ces garde-corps doivent tous être en mesure de résister à deux charges statiques simultanées, appliquées sur la lisse supérieure : 450 N verticalement et 900 N horizontalement (Figure 1). Dans un chantier, on rencontre principalement les garde-corps métalliques et en bois, et très rarement les garde-corps en câble d'acier.

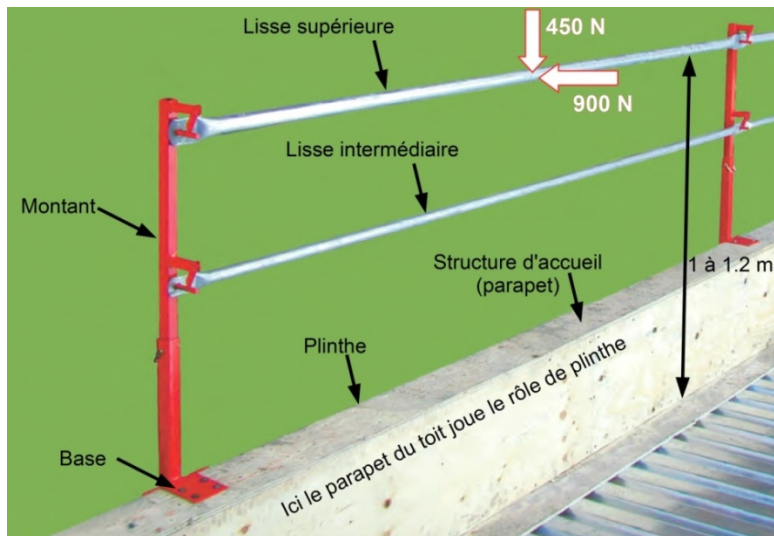


Figure 1. Éléments de garde-corps temporaire métallique.



Figure 2. Garde-corps temporaire en bois (apparaît non conforme au CSTC).

2.2 Conception des garde-corps

2.2.1 Exigences du CSTC

L'encadré ci-après présente les exigences de résistance et de construction du CSTC (CSTC, 2018).

3.8.2. Résistance :

1) *Un garde-corps doit être conçu pour :*

- a) *résister à une force horizontale concentrée de 900 N appliquée à n'importe quel point de la lisse supérieure; et*
- b) *résister à une force verticale concentrée de 450 N appliquée à n'importe quel point de la lisse supérieure.*

2) *Aux endroits où il y a une concentration de travailleurs ainsi qu'aux autres endroits où un garde-corps peut être soumis à des pressions extraordinaires, celui-ci doit être renforcé en conséquence.*

3) *Il faut prendre les moyens propres à éviter que des objets, des outils ou des matériaux ne tombent d'un niveau à un autre à moins qu'il n'existe un garde-corps renforcé en conséquence.*

3.8.3. Construction :

1) *Tout garde-corps doit avoir une hauteur qui varie entre 1 m et 1,2 m au-dessus de l'aire où le travailleur se trouve.*

2) *Un garde-corps en bois doit être constitué d'une :*

- a) *lisse supérieure d'une épaisseur minimale de 40 mm sur une largeur de 90 mm appuyée sur des montants de même dimension espacés d'au plus 1,8 m placés de telle façon que la largeur de 90 mm du montant soit dans l'axe de la largeur de la lisse supérieure;*
- b) *traverse intermédiaire d'au moins 75 mm de large à mi-hauteur et fixée solidement à l'intérieur des montants;*
- c) *plinthe d'au moins 90 mm de hauteur et fixée solidement à l'intérieur des montants.*

3) *Un garde-corps en câble d'acier doit être maintenu rigide à l'aide d'un tendeur à vis et doit être constitué :*

- a) *d'un câble d'acier d'au moins 10 mm de diamètre pour la main courante et la traverse intermédiaire;*
- b) *de montants espacés d'au plus 3 m;*
- c) *d'une plinthe d'au moins 90 mm de hauteur et fixée solidement à l'intérieur des montants.*

3.8.4. *Garde-corps métalliques : Les garde-corps métalliques doivent être conçus, construits, installés et entretenus de manière à assurer une résistance et une sécurité égales ou supérieures à celles qui sont exigées pour les garde-corps en bois.*

La Figure 2 est un exemple de garde-corps en bois construit à pied d'œuvre et qui, à première vue, n'est pas conforme au CSTC. En effet, la lisse intermédiaire n'est pas fixée correctement. De plus, la fixation de la lisse supérieure est plutôt douteuse. Mais le plus préoccupant sur cette photo reste la fixation des montants du garde-corps à la structure d'accueil : seulement quelques clous et une hauteur de fixation de l'ordre de 5 cm. Il fait peu de doutes que ce type de garde-corps ne soit pas en mesure de résister aux charges prescrites par le CSTC.

La Figure 2 illustre l'un des problèmes fondamentaux se posant lors de l'installation de garde-corps temporaires : la fixation des montants à la structure d'accueil. En effet, s'il est relativement aisé de concevoir les montants et les lisses des garde-corps (soit en bois en suivant les prescriptions du CSTC, soit en acier en utilisant les méthodes classiques de la résistance des matériaux et la norme de conception en acier (CAN/CSA-S16, 2013), la fixation à la structure d'accueil est souvent un problème délicat du fait des incertitudes sur la résistance réelle à l'arrachement des vis ou des clous. Une activité de recherche a été menée à l'IRSST pour valider des garde-corps métalliques en laboratoire (Lan et Daigle, 2011). Pour cette étude l'accent était mis sur la résistance des montants et lisses plutôt que sur la fixation à la structure d'accueil reconstituée en laboratoire. On peut souligner qu'à l'occasion de l'étude de Lan et Daigle (2011), une rupture de la fixation d'un montant a été observée lors d'un essai dynamique.

2.2.2 Fixation des montants à la structure d'accueil

Toits plats de petites dimensions ou balcons

Pour les garde-corps en bois, réalisés à pied d'œuvre, qui ont pu être observés lors de la construction de petits bâtiments résidentiels, le fond de clouage ne semble pas poser problème, il ne s'agit pas d'une simple feuille de contreplaqué (*plywood*) ou d'un panneau à lamelles minces orientées (*oriented strand board, OSB*). Les solives ajourées en bois d'œuvre sont couramment utilisées sur les chantiers de construction domiciliaire (Figure 3). Ces solives ajourées sont généralement composées de SPF (*spruce, pine, fir*) 2 po x 3 po (38 mm x 64 mm) ou 2 po x 4 po (38 mm x 89 mm) de classe 2. La mise en place de garde-corps sur ces éléments structuraux est relativement aisée. Les montants et lisses en 2 po x 4 po (38 mm x 89 mm) sont aussi des SPF de classe 2, qui est une catégorie de bois d'œuvre canadien. L'essence de bois est donc variable et il n'est généralement pas possible de savoir quelle essence sera livrée sur le chantier *a priori*. Il peut s'agir indifféremment d'épinette, de pin ou de sapin, soit des essences qui présentent des caractéristiques similaires, raison pour laquelle elles ont été regroupées sous le terme SPF pour le commerce.



Figure 3. Garde-corps temporaire en bois installé sur des solives ajourées.

La hauteur la plus importante utilisée pour les solives ajourées est généralement de 16 pouces, soit moins que les 24 pouces recommandés dans la vidéo de la CNESST pour une installation de garde-corps sur un mur en bois (CNESST, 2011). La résistance de garde-corps en bois installés sur les solives ajourées n'a pas encore été étudiée. Plus particulièrement, la résistance de la fixation des montants aux solives ajourées est inconnue.

D'un point de vue pratique, il serait bon de savoir :

- si certaines solives sont de trop petites dimensions pour permettre l'installation de garde-corps en bois;
- en fonction des dimensions de solives, quel système de fixation est nécessaire pour résister aux charges prescrites par le CSTC : nombre de clous ou de vis, positionnement sur la solive, etc.

Murs préfabriqués en bois

Les murs préfabriqués sont couramment utilisés dans les chantiers de construction résidentielle. Une méthode pour protéger les travailleurs contre les chutes de hauteur consiste à fixer des garde-corps en bois sur le mur préfabriqué au sol, avant de le mettre en place sur la bâtisse en construction. Ainsi, lorsque les travailleurs commencent les travaux à l'étage supérieur, la protection collective est déjà en place. La question de la résistance de ces garde-corps en bois reste cependant posée pour les entrepreneurs : il faudrait vérifier la résistance et documenter une méthode de fixation fiable dans ces structures.

Les murs préfabriqués ont différentes épaisseurs. Ils sont généralement réalisés en 2 po x 4 po, 2 po x 6 po ou 2 po x 8 po et ces montants sont espacés de 16 po centre à centre. Les interstices entre les éléments en bois sont remplis avec un matériau isolant. Une coupe de mur préfabriqué est présentée à la Figure 4.

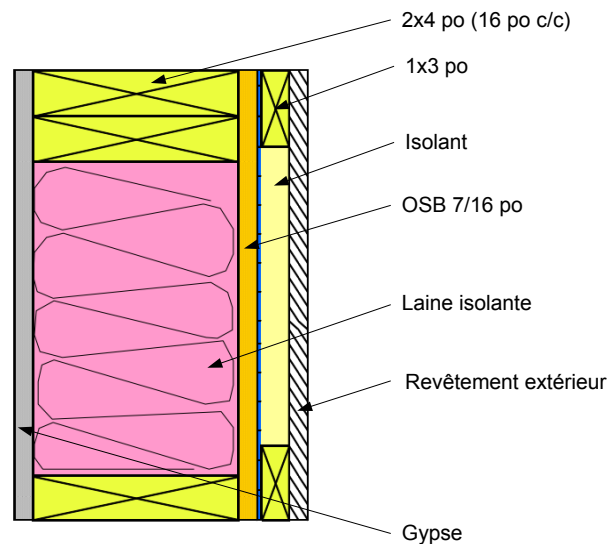


Figure 4. Structure de mur préfabriqué en 2 po x 4 po.

Les montants des garde-corps en bois sont donc installés sur une superposition de plusieurs éléments : 1 po x 3 po, OSB 7/16 po et 2 po x 4 po dans le cas du mur présenté à la Figure 4 (le revêtement extérieur est installé en dernière étape, une fois que les garde-corps sont retirés).

Toits plats de grandes dimensions

Sur les toits plats de grandes dimensions, qui requièrent en conséquence une durée de travail relativement importante, on a généralement recours à des garde-corps métalliques. Ces garde-corps sont vissés aux parapets de la structure. La résistance de ces garde-corps a été validée en laboratoire pour les structures neuves dans une précédente étude. Le fond de vissage ne posait pas de problème puisqu'il était possible de visser exactement dans les poutrelles en 2 po x 6 po (38 mm x 140 mm). Pour les travaux de réhabilitation ou de réfection de toiture, le fond de vissage sera le plus souvent inconnu : en effet, il est difficile de savoir si l'on visse dans le bois ou simplement dans un panneau de contreplaqué (*plywood*), sur un panneau à lamelles minces orientées (aussi appelé « aggloméré », *oriented strandboard OSB*), sur un panneau de grandes particules (*particlewood*) ou sur un panneau de fibres (*fiberboard*).

2.3 Résistance à l'arrachement des vis

Du fait de l'effet de levier, les forces d'arrachement des vis de fixation du montant à la structure d'accueil sont très importantes (Galy et Lan, 2016). Les résistances à l'arrachement des vis dans ces différents types de matériaux ont été étudiées par quelques chercheurs. Il faut cependant souligner que ces valeurs de résistance calculées peuvent varier fortement par rapport à ce qui est observé *in situ*, même sur une même planche ou un même panneau (Erdil, Zhang, et Eckelman, 2002). Par ailleurs, il faut souligner que les valeurs d'arrachement données par les formules empiriques sont obtenues avec un temps de chargement variant entre 5 et 10 minutes (Rammer, 2010), ce qui est très différent d'une charge d'impact correspondant à l'arrêt d'une chute. De plus, ces formules sont valables pour des diamètres spécifiques de trous prépercés (dont les pourcentages varient en fonction de l'essence de bois). Enfin, dans le

cas d'un garde-corps, les vis ne sont pas soumises à une force d'arrachement directe comme dans le cas de ces tests normalisés, mais à une combinaison de cisaillement et d'arrachement due au moment de flexion du montant du garde-corps.

La Figure 5 montre que la résistance à l'arrachement d'une vis varie beaucoup (du simple au triple) en fonction de la profondeur du fond de vissage (1 po ou 0,75 po) et selon le diamètre de la vis. Le matériau de la structure d'accueil a également une influence primordiale. Or, dans le contexte de travaux sur les structures existantes, le type de matériau, et surtout son état (hygrométrie, pourrissement) est le plus souvent inconnu. Il devient, dans ces cas de figure, très compliqué de prévoir un système de fixation fiable et simple d'installation. D'un point de vue pratique, pour les garde-corps métalliques, on opte donc pour un système de fixation généralement surdimensionné. Mais le type de fixation (une seule plaque, deux plaques, système serre parapet, etc.) varie d'un fabricant de garde-corps à l'autre. Sur des structures neuves, les essais en laboratoire n'ont pas mis en évidence de type de fixation présentant un comportement plus sécuritaire sous chargement (Lan et Daigle, 2011). Cependant, pour un parapet vieux de plusieurs années, de petites dimensions, ou dont l'état du matériau est inconnu, la question de savoir quel type de fixation de garde-corps est le plus indiqué pour assurer la sécurité des travailleurs lors de travaux de réfection de toiture reste posée.

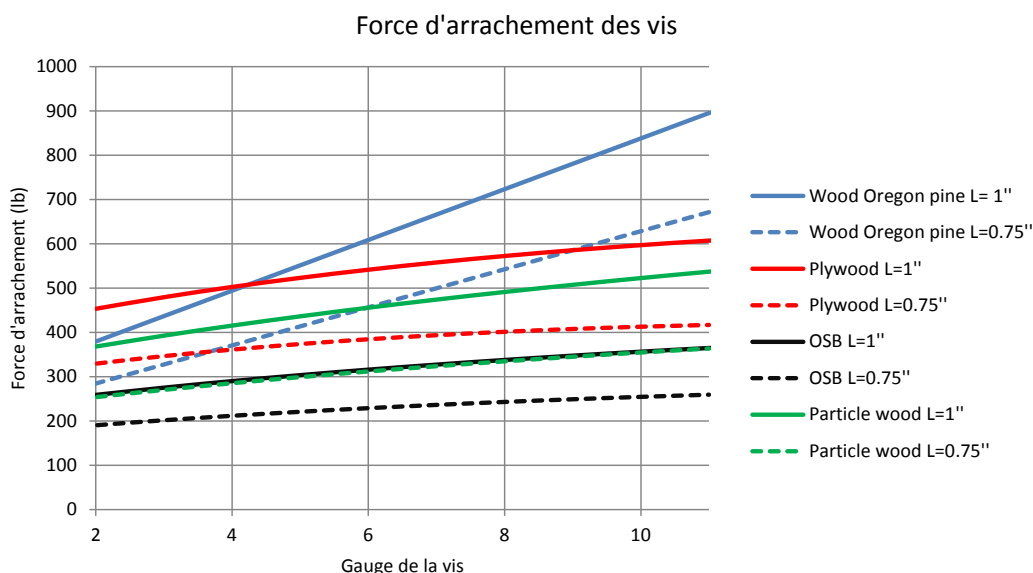


Figure 5. Comparaison des résistances à l'arrachement pour différents calibres de vis.

3. OBJECTIFS DE RECHERCHE

Les objectifs de cette activité de recherche sont :

- 1) De vérifier la résistance des garde-corps en bois fixés sur une structure neuve, composée de solives ajourées et reconstituée en laboratoire;
- 2) De vérifier la résistance des garde-corps en bois fixés sur un mur préfabriqué reconstitué en laboratoire;
- 3) De comparer le comportement sous charges de garde-corps métalliques installés sur des toits plats de structures existantes de différents âges.

4. MÉTHODOLOGIE

4.1 Essais en laboratoire : garde-corps en bois fixés sur des solives et un mur préfabriqué

4.1.1 Laboratoire d'essais

Le laboratoire d'essais est aménagé dans le local 1564 au 15^e étage de l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST). Le montage d'essais sur les solives et ses dimensions sont présentés à la Figure 6 en vue du dessus, et à la Figure 7 pour le mur préfabriqué.

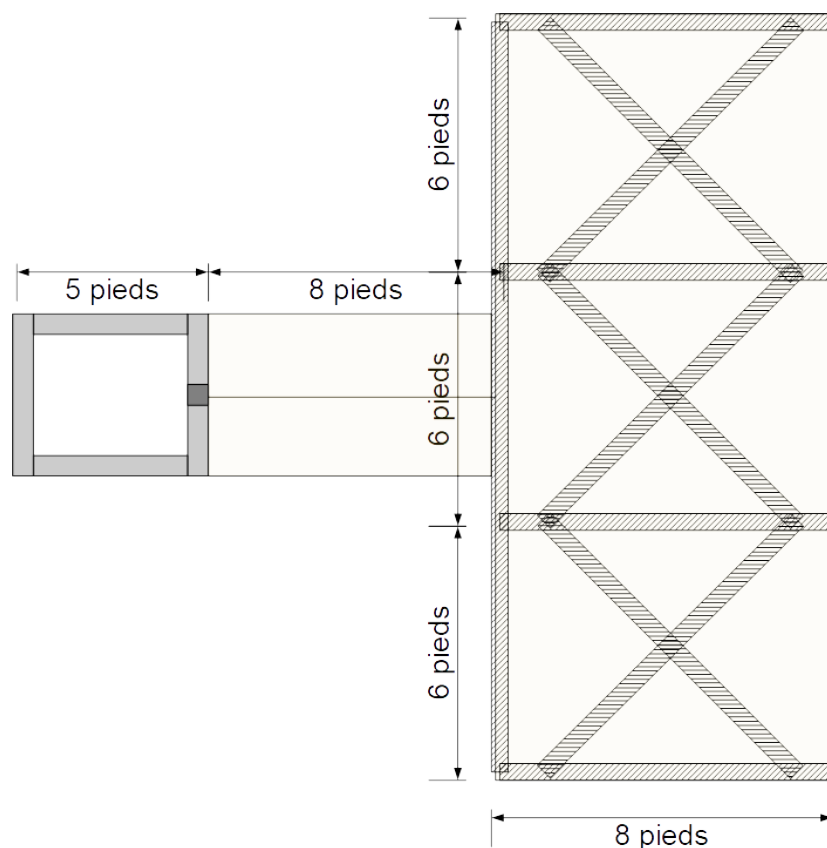


Figure 6. Aménagement du laboratoire pour les essais sur les solives.

Le laboratoire d'essais ne permet pas de réguler avec précision la température ou l'hygrométrie. Ces deux facteurs peuvent avoir un impact sur la teneur en eau du bois, et donc affecter la résistance à l'arrachement des vis ou clous qui seront fixés dans les solives ou montants de garde-corps. Néanmoins, l'air conditionné de l'immeuble est gardé à température à peu près constante et les essais n'ont commencé que quelques semaines après le début d'entreposage du bois dans le laboratoire, ce qui devrait limiter la variabilité des résultats d'essais.

Afin de fixer les solives, un faux plancher principal de 18 pieds de long et de 8 pieds de large a été construit au laboratoire. Le faux plancher est composé d'une ossature en 2 po x 4 po en SPF bâtie sur une base de contre-plaqué de 3/4 de pouce d'épaisseur et couverte par le même type de contre-plaqué.

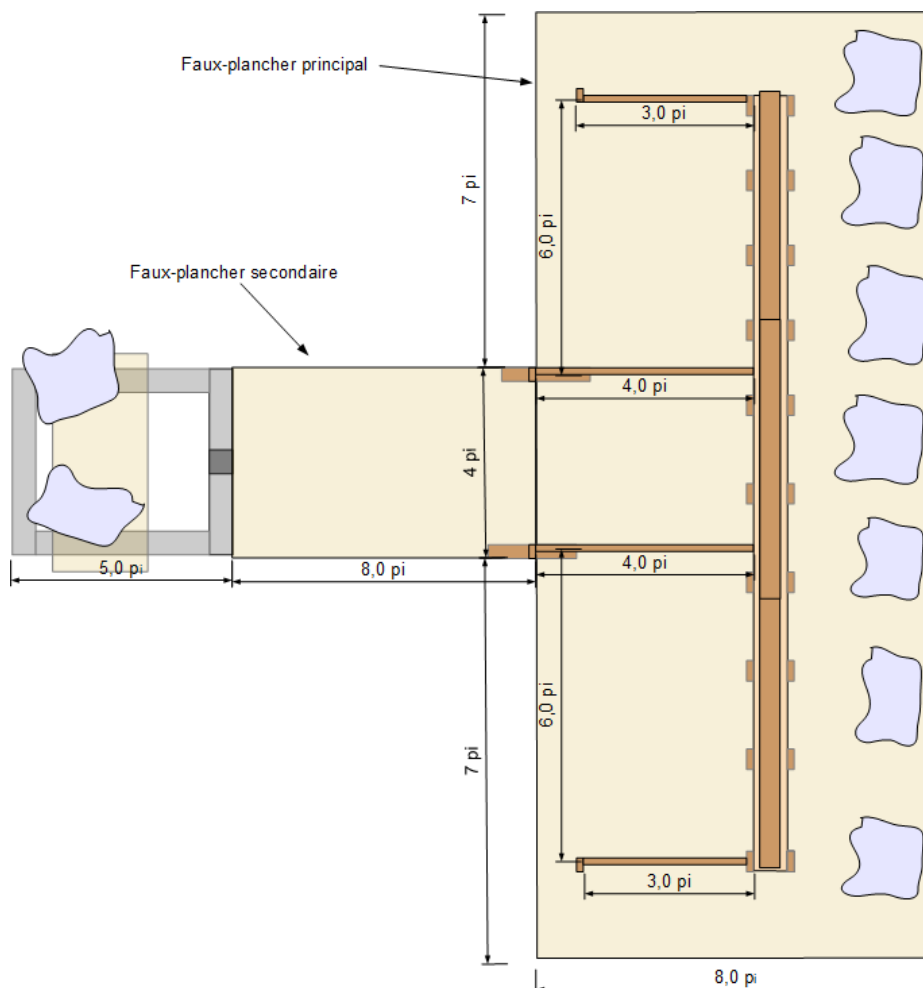


Figure 7. Aménagement du laboratoire pour les essais sur le mur préfabriqué.

Pour empêcher le soulèvement du faux-plancher principal lors des essais, sept sacs de sel de déglacage de 20 kg (44 lb) chacun sont placés sur ce dernier, pour un poids total de 1372,9 N sans tenir compte du poids du faux-plancher lui-même et celui des solives. De même pour empêcher son déplacement, le faux-plancher principal, qui accueille les garde-corps, est relié au support de treuil par le biais d'un faux plancher secondaire de 8 pieds par 4 pieds bâti de la même façon que le principal. Le faux-plancher principal et le support de treuil sont disposés contre les murs l'un en face de l'autre. Le faux-plancher secondaire permet donc de combler le vide entre ces deux structures et, par conséquent, il permet d'éliminer tout déplacement du système durant les essais.

4.1.2 Charge horizontale

Attaché à un support métallique, le treuil mécanique permet, à l'aide d'une manivelle et d'une courroie (longue), d'appliquer manuellement la traction sur le garde-corps (Figure 8). Son axe de rotation est situé à 1,52 m de hauteur. D'après les indications du fabricant, le treuil utilisé a une capacité maximale de 900 lb soit 4 003 N en traction. La charge horizontale est appliquée simultanément à une charge verticale statique, de 449 N dans le cas des essais sur les solives, et de 251 N dans le cas des essais sur le mur préfabriqué (voir section 4.1.3). La force est appliquée horizontalement dans le cas des essais sur les solives, et avec un angle dans le cas des essais sur le mur préfabriqué, créant ainsi une composante horizontale et une composante verticale. Lors de l'application de la charge horizontale, les montants vont se déplacer en direction du treuil et la hauteur de la lisse du garde-corps va légèrement diminuer. Ce déplacement entraînera une perte d'horizontalité de la charge avec un angle d'environ 1° par rapport à l'horizontale, ce qui a pour effet de faire apparaître une composante verticale de 25 N pour une charge de 1 500 N, la composante horizontale quant à elle diminue seulement de 0,23 N. Cet écart est considéré comme acceptable.

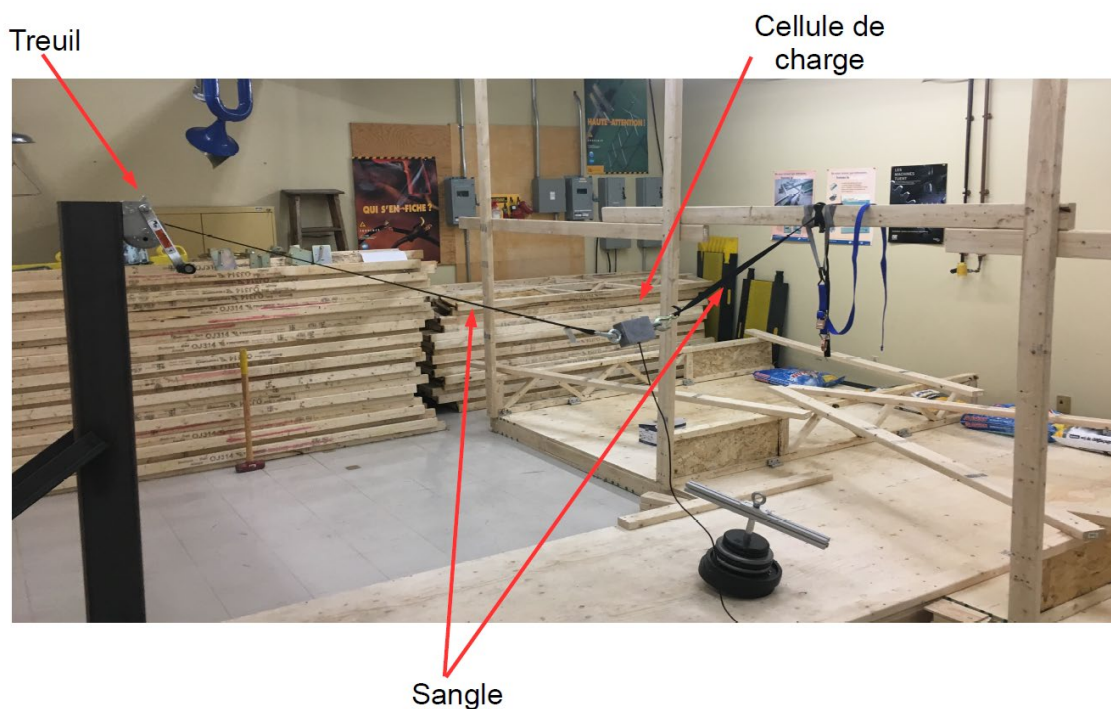


Figure 8. Treuil mécanique, longe et cellule de charge.

Le treuil mécanique est supporté par une structure métallique composée de membrures en tubes carrés creux en acier (HSS) de 5 po x 5 po x $\frac{1}{4}$ po (127 mm x 127 mm x 6,4 mm) (Figure 9). La base de cette structure est constituée de l'assemblage de 4 morceaux de ces tubes, boulonnés ensemble en forme d'un rectangle de 133 cm x 120 cm. Deux cornières en acier de 2 po x 2 po x $\frac{1}{4}$ po (51 mm x 51 mm x 6,4 mm) sont boulonnées du centre de la colonne à la base de la structure. Ces cornières servent de contreventement et limitent la déformation en flexion de la colonne. Pour empêcher le soulèvement du support de treuil lors de la réalisation des essais, deux sacs de sel de déglçage de 20 kg (44 lb) chacun sont placés sur sa base. Ayant observé un léger soulèvement du support du treuil lors de l'essai N.07, deux morceaux

de 2 po x 4 po, cloués bout à bout sont installés entre la base du support et le plafond en béton armé du laboratoire pour éliminer toute possibilité d'un éventuel soulèvement.

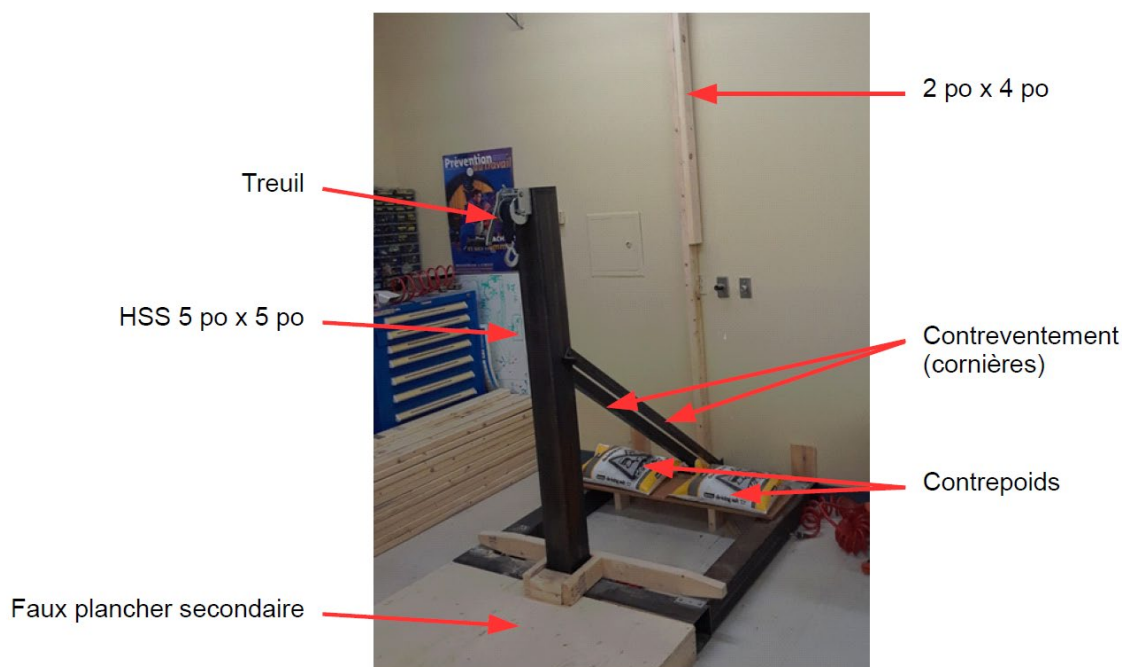


Figure 9. Support de treuil.

La cellule de charge utilisée (Figure 8), modèle Vishay S500 60001, fonctionne en tension comme en compression, et possède une capacité maximale de 500 lb (environ 2 224 N). Elle permet de mesurer la tension maximale appliquée sur les garde-corps avec une précision de $\pm 0,03\%$ (soit $\pm 0,27$ N pour une charge mesurée de 900 N).

Le système d'acquisition des données est composé d'un Data tracker 240 de la compagnie canadienne Intertechnology inc. et d'un ordinateur muni d'un logiciel d'acquisition. Le Data tracker permet de faire la lecture de la force horizontale en newton à une fréquence de 10 Hz et un taux d'erreur de 0,02 %.

4.1.3 Charge verticale

4.1.3.1 Essais sur les solives

Les garde-corps à l'étude sont testés selon les exigences du CSTC. Selon l'article 3.8.2 alinéa 1-b du CSTC, un garde-corps doit être conçu pour : « résister à une force verticale concentrée de 450 N appliquée à n'importe quel point de la lisse supérieure ». La charge verticale est constituée d'un assemblage des plaques et tiges métalliques. La pesée de la masse a été effectuée à l'aide de la cellule de charge. Le poids mesuré est de 449 N. L'écart entre le poids exigé par le CSTC et le poids pesé en laboratoire est d'environ 1 N (0,22 %). Cette charge verticale statique est appliquée simultanément à la charge horizontale.



Figure 10. Dispositif permettant l'application de la charge verticale.

4.1.3.2 Essais sur le mur préfabriqué

Pour les premiers essais, la charge verticale était uniquement la composante verticale de la force oblique appliquée sur la lisse supérieure du garde-corps. Elle était obtenue à l'aide du sinus de l'angle d'application de la force oblique.

La hauteur du support du treuil mécanique (1,52 m par rapport au faux plancher) qui permet d'appliquer la force oblique n'a pas permis d'obtenir des angles plus grand que $13,5^\circ$ lors des essais 1 à 16 sur le mur préfabriqué. Cet angle n'a pas permis d'obtenir des composantes verticales qui dépassent 329 N lors de ces 16 premiers essais (voir annexe B pour les résultats et annexe C pour le schéma du montage avec les dimensions). Pour ces essais, il a été possible de respecter l'exigence du CSTC concernant la charge horizontale (soit un minimum de 900 N), mais pas celle concernant la charge verticale (450 N). Une charge verticale supplémentaire de 251 N a été ajoutée lors de la réalisation des essais 17 à 97. Grâce à cette charge, lorsque la charge horizontale atteignait 900 N, la charge verticale était d'environ 450 N (dépendamment de la hauteur exacte de la lisse du garde-corps), permettant ainsi de vérifier les deux critères de résistance du CSTC.

4.1.4 Solives

Les solives ajourées utilisées à l'occasion de ce projet sont composées d'un assemblage de 2 po x 3 po en SPF et d'une âme en OSB de 0,5 po d'épaisseur (Figure 11). Pour les essais, des solives ajourées de différentes hauteurs sont utilisées : 9,5 po, 12 po, 14 po et 16 po. Chaque solive est composée de deux membrures horizontales en 2 po x 3 po, qui sont reliées entre elles par des 2 po x 3 po en forme des treillis sur une longueur de 62,5 pouces et par une plaque d'OSB sur une longueur de 34 pouces.

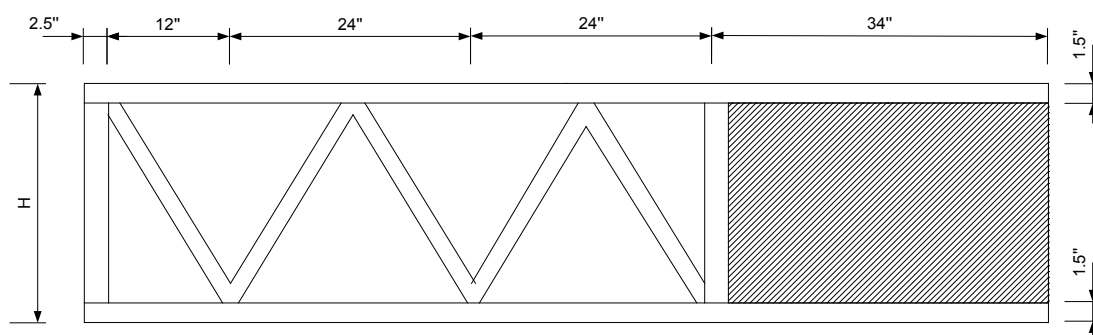


Figure 11. Vue de face d'une solive ajourée.

Une extrémité de la solive est composée d'un morceau vertical de 2 po x 3 po placé de façon à travailler dans son axe fort (extrémité gauche dans le cas de la Figure 11) et l'autre extrémité est faite avec une âme en OSB de 0,5 po, prise en sandwich entre les deux membrures horizontales en 2 po x 3 po (extrémité droite dans le cas de la Figure 11).

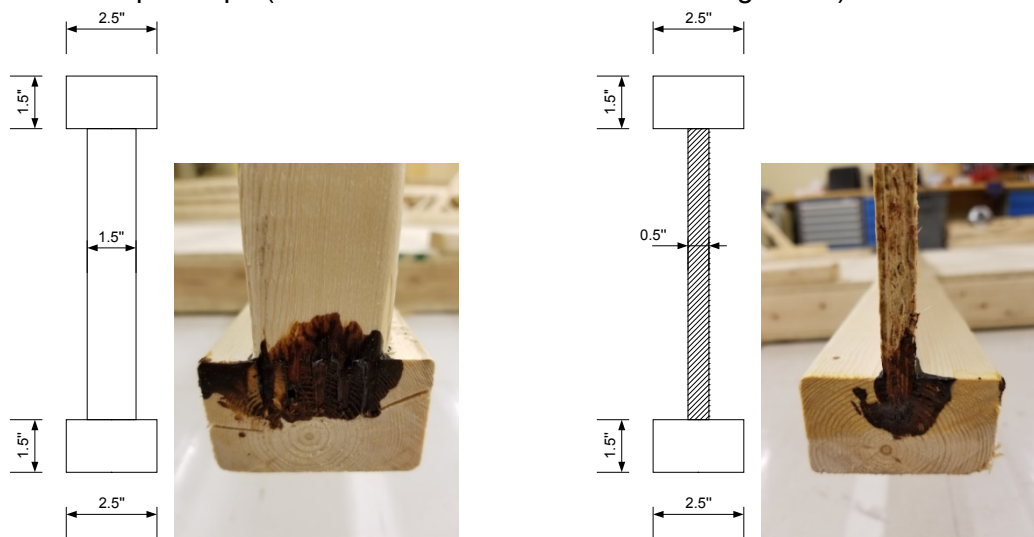


Figure 12. Extrémité en 2 po x 3 po et extrémité en OSB 0,5 po pour une solive ajourée.

Pour réaliser les essais, les solives sont fixées sur le faux-plancher principal par des cornières en acier de dimensions 51 mm x 51 mm x 6,4 mm de 7,5 cm de long. Pour les essais N.1.1 à N.38, les contreventements utilisés étaient des 2 po x 4 po vissés sur la partie supérieure des solives à l'aide de vis #10 de 3,5 po de long. À partir de l'essai N.39, les contreventements en 2 po x 4 po ont été remplacés par des solives ajourées. Elles présentent l'avantage d'être insérées par butée, sans vissage ni clouage, entre les solives et permettent donc de diminuer les délais entre chaque essai de chargement.

Lorsque la fixation le permettait (voir la sous-section 4.1.6), l'installation des montants des garde-corps à l'extrémité de la solive présentant l'OSB de 0.5 po était privilégiée. Ceci permettait de scier la partie de la solive où les clous ou vis s'étaient fichés après chaque essai, de sorte que pour tout nouvel essai, les clous ou vis étaient installés dans un 2 po x 3 po

comme neuf. Pour les fixations de montants nécessitant l'utilisation de la partie verticale en 2 po x 3 po, un seul essai était réalisé à cette extrémité de la solive, et des solives neuves étaient utilisées pour les répétitions. Au total, 24 solives de chacune des quatre hauteurs ont été utilisées pour la réalisation des essais en laboratoire (soient 96 solives au total).

4.1.5 Mur préfabriqué

Le mur préfabriqué utilisé à l'occasion de ce projet a été assemblé et monté en laboratoire à partir de 2 po x 4 po en SPF et d'OSB 7/16 po. La structure de mur préfabriqué est présentée à la Figure 13. Le mur reconstitué en laboratoire a une hauteur de 48 po (1200 mm) ce qui permet de faire plusieurs essais sans fragiliser la structure en 2 po x 4 po en fixant les garde-corps plus ou moins hauts sur le mur. Les murs préfabriqués en 2 po x 4 po sont les plus petits, et les murs en 2 po x 6 po sont probablement plus courants. Néanmoins, considérant les types de vis et de clous utilisés, la profondeur des montants (4 po, 6 po, 8 po ou même 10 po) n'a pas d'impact sur les résultats d'essais, puisque le fond de clouage ou de vissage sera de moins de 2 po.

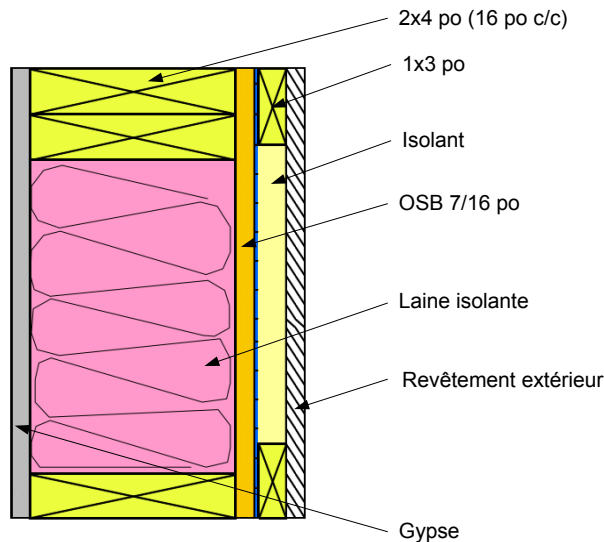


Figure 13. Coupe de mur préfabriqué en 2 po x 4 po.

Contrairement à ce qui est présenté sur la coupe à la Figure 13, le mur préfabriqué monté en laboratoire ne contient pas de la laine isolante et ne possède pas un revêtement extérieur, mais les fourrures en 1 po x 3 po ont été conservées. L'absence de ces deux éléments n'influe pas sur la résistance des garde-corps étudiés dans le contexte de cette activité de recherche. En effet, la mousse isolante n'apporte pas de rigidité structurelle, et le revêtement extérieur est généralement mis en place en dernier, une fois les travaux en hauteur terminés, et donc les garde-corps enlevés. Les dimensions des différents éléments qui composent le mur préfabriqué, leurs localisations ainsi que leurs orientations sont fournies en annexe C.

Pour s'assurer de la stabilité du mur préfabriqué et de son contreventement, un essai de chargement a été effectué directement sur le mur préfabriqué (Figure 14). Pour appliquer la force de traction, le mur a été perforé au centre, juste en dessous de sa lisse supérieure. La sangle qui permet d'appliquer la traction a été attachée au mur à travers le trou percé.



Figure 14. Essai de traction sur le mur préfabriqué.

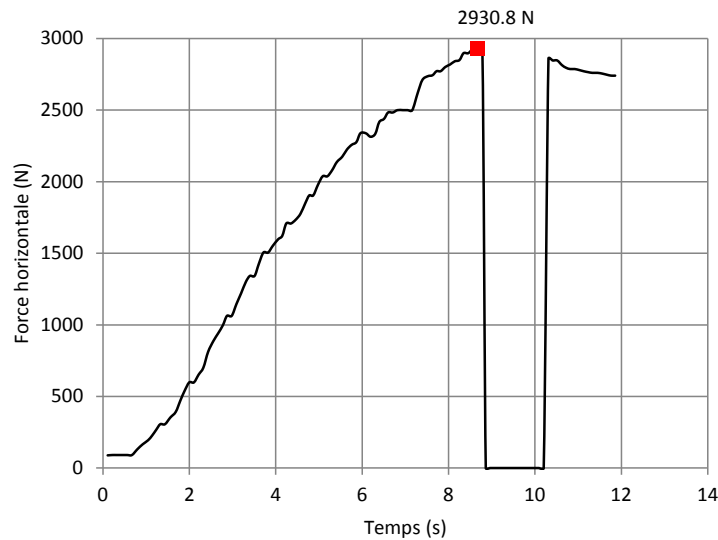


Figure 15. Résultats de l'essai de traction sur le mur préfabriqué.

La présence d'une chute sur la courbe de la résistance à l'arrachement du mur préfabriqué n'est pas due à un arrachement ni à une rupture : elle est causée par une interruption de la lecture des données par la cellule de charge lorsque la force de traction atteinte dépasse sa capacité maximale de lecture (Figure 15). La lecture a repris lors de la diminution graduelle de la traction appliquée sur le mur préfabriqué. La résistance à l'arrachement du mur préfabriqué est donc supérieure à 2 930 N. Durant la réalisation de l'essai, le mur préfabriqué est resté stable et n'a pas bougé de manière visible à l'œil nu.

4.1.6 Nomenclature de fixation

Cette section présente les différentes fixations des garde-corps testées (clous, vis, équerres, visseuse, etc.). Pour les essais, la cloueuse pneumatique était équipée d'une jauge de

pression, et la pression a été gardée constante à 90 psi. Toutes les fixations utilisées dans cette étude ont été mises en place en enfonçant les clous ou vis perpendiculairement à la surface du bois, sans toutefois que l'angle exact soit mesuré.

4.1.6.1 Propriétés des clous et vis

Tableau 1. Types de clous utilisés



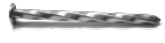


Image	Type	Taille de clou	Calibre (gauge)	Diam. tige	Diam. tête	Longueur tige	Outil de fixation
	Annelé	-	11	0,120 po	17/64 po	3,25 po	Cloueuse
	Lisse	-	11	0,120 po	17/64 po	3,25 po	Cloueuse
	Vrillé	16D	8	0,165 po	11/32 po	3,5 po	Marteau

Tableau 2. Types de vis utilisées

Image	Type	Calibre (gauge)	Diam. tige	Diam. tête	Longueur tige	Outil de fixation
	Vis à bois	10	3/16 po	0,385 po	3,5 po	visseuse
	Tirefond	3/8 po	3/8 po	0,562 po (coin à coin)	3,0 po	clé à tête hexagonale

4.1.6.2 Clous annelés

Les clous annelés sont un type de clous utilisé très fréquemment dans l'assemblage de charpentes en bois. Un clou annelé est composé d'une tige dont la partie inférieure est munie d'anneaux. Il est souvent en acier inoxydable. À l'occasion de ce projet, c'est le clou annelé calibre 11 qui est utilisé. Les propriétés de ce clou sont présentées dans le Tableau 1.

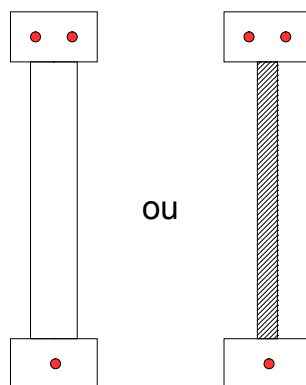


Figure 16. Fixation CA21.

La fixation CA21 (Figure 16) est composée de 3 clous annelés installés à l'aide d'une cloueuse pneumatique dont 2 sont plantés dans le 2 po x 3 po du haut de la solive et 1 autre dans celui du bas. Cette fixation n'a pas été retenue à cause des faibles résistances observées lors des essais préliminaires.

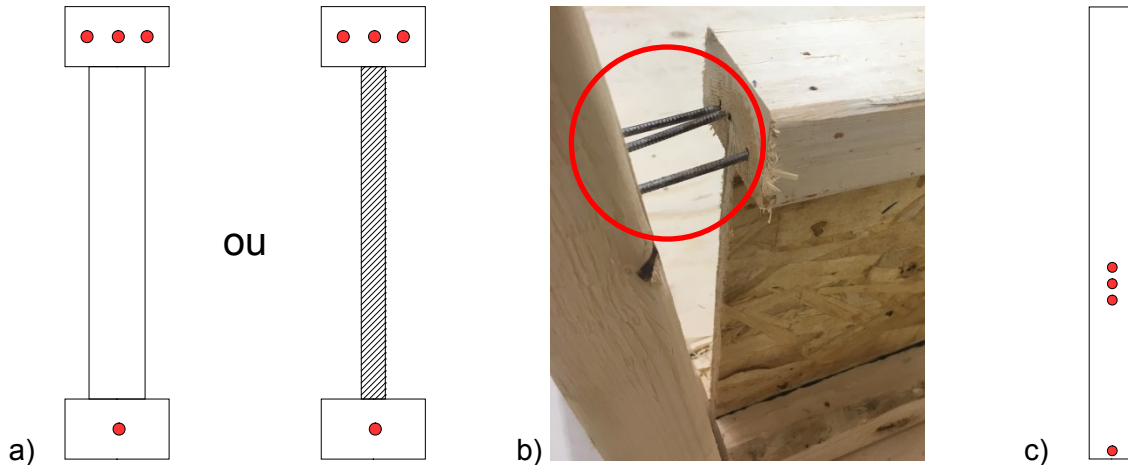


Figure 17. Fixation CA31 pour une solive (a), clou central décalé afin d'éviter l'OSB (b), et fixation CA31 pour le mur préfabriqué (c).

La fixation CA31 (Figure 17) est composée de 4 clous annelés installés à l'aide d'une cloueuse pneumatique dont 3 sont plantés dans le 2 po x 3 po du haut de la solive et 1 autre dans celui du bas. Lorsque le montant du garde-corps est fixé sur l'extrémité en OSB de la solive, le clou central du 2 po x 3 po de haut est décalé d'environ 5 mm au-dessus de la ligne des deux autres clous afin d'éviter d'être enfoncé directement dans l'OSB qui est moins résistant que le bois. Cette fixation a été retenue, car tout en étant économique, elle a permis d'observer des résistances intéressantes lors des essais préliminaires. Pour une utilisation sur le mur préfabriqué, les trois clous du haut sont alignés verticalement, afin de se ficher dans le montant en 2 po x 4 po à l'intérieur du mur préfabriqué.

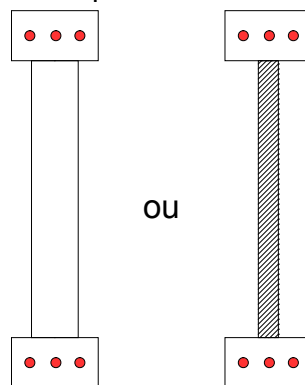


Figure 18. Fixation CA33.

La fixation CA33 (Figure 18) est composée de 6 clous annelés mis à l'aide d'une cloueuse pneumatique dont 3 sont plantés dans le 2 po x 3 po du haut de la solive et 3 autres dans celui du bas. Cette fixation n'a pas été retenue même si les résistances obtenues lors des essais préliminaires étaient supérieures à la résistance minimale exigée par le CSTC. Les essais qui

ont suivi ont prouvé que des résistances similaires ou supérieures pouvaient être obtenues avec moins de clous (une fixation plus économique) : CA31.

4.1.6.3 Clous lisses

Les clous lisses sont un type de clous également utilisé dans l'assemblage de charpentes en bois. Ses propriétés sont présentées dans le Tableau 1.

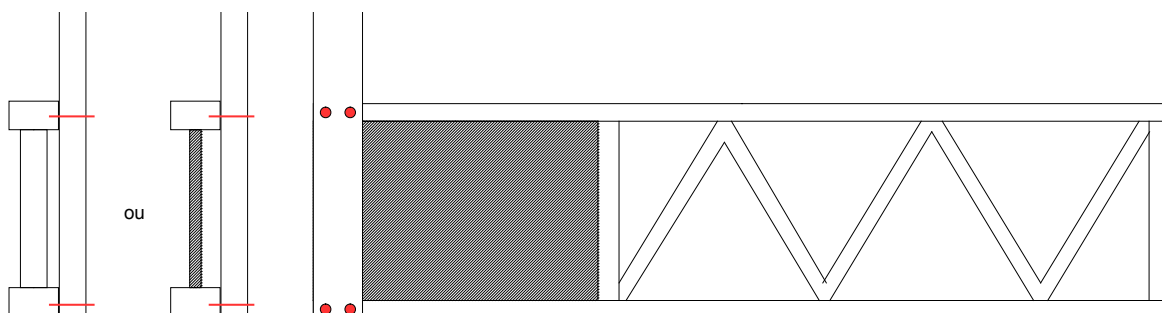


Figure 19. Fixation CL22 – AF.

La fixation CL22 (Figure 19) est composée de 4 clous lisses installés à l'aide d'une cloueuse pneumatique dont 2 sont plantés dans le 2 po x 3 po du haut de la solive et 2 autres dans celui du bas. Les montants sont fixés aux solives de manière à travailler sur leur axe fort. Ainsi, pour permettre une libre rotation des montants et pour mesurer la résistance à l'arrachement réelle des clous, les solives d'accueil sont décalées d'environ 4 pouces vers l'extérieur du faux plancher principal.

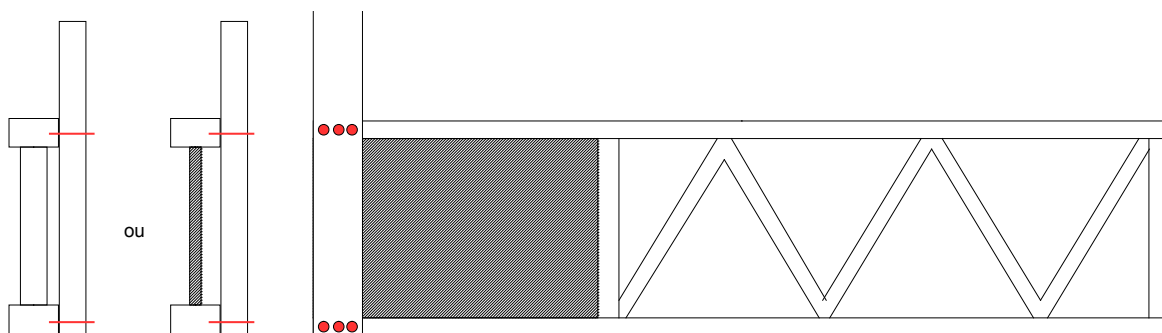


Figure 20. Fixation CL33 – AF.

La fixation CL33 (Figure 20) est composée de 6 clous lisses installés à l'aide d'une cloueuse pneumatique dont 3 sont plantés dans le 2 po x 3 po du haut de la solive et 3 autres dans celui du bas. Les montants sont fixés aux solives de manière à travailler sur leur axe fort.

La fixation CL31 (Figure 21) est composée de 4 clous lisses installés à l'aide d'une cloueuse pneumatique dont 3 sont plantés dans le 2 po x 3 po du haut de la solive et 1 autre dans celui du bas. Comme pour la fixation CA31, lorsque le montant du garde-corps est fixé sur l'extrémité en OSB de la solive, le clou central du 2 po x 3 po de haut est toujours décalé d'environ 5 mm au-dessus de la ligne des deux autres clous afin d'éviter d'être enfoncé directement dans l'OSB

qui est moins résistant que le bois. Cette fixation a été retenue pour la suite des essais, car tout en étant économique, elle a permis d'observer des résistances intéressantes lors des essais préliminaires.

Pour une utilisation sur le mur préfabriqué, les trois clous du haut sont alignés verticalement, afin de se ficher dans le montant en 2 po x 4 po à l'intérieur du mur préfabriqué.

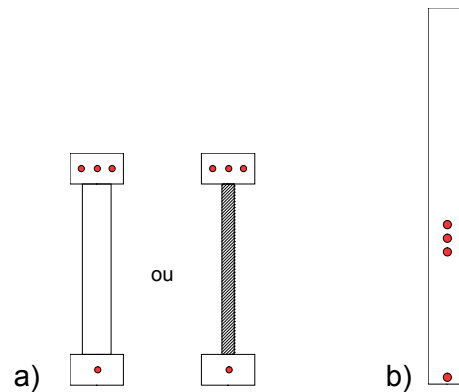


Figure 21. Fixation CL31 pour les solives (a) et pour le mur préfabriqué (b).

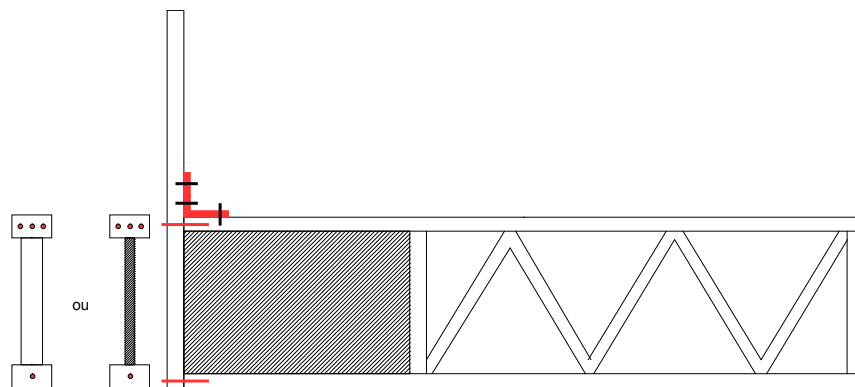


Figure 22. Fixation CL31 - E.

La fixation CL31 - E (Figure 22) est composée de 4 clous lisses installés à l'aide d'une cloueuse pneumatique dont 3 sont plantés dans le 2 po x 3 po du haut de la solive et 1 autre dans celui du bas. Une équerre métallique de dimensions 3 po x 3 po est fixée entre le montant du garde-corps et le dessus de la solive, à l'aide de 2 vis à bois #8 dans le montant (qui travaillent en arrachement) et 1 vis à bois #8 dans le 2 po x 3 po de la solive (qui travaille en cisaillement).

Pour une utilisation sur le mur préfabriqué, les trois clous du haut sont alignés verticalement, afin de se ficher dans le montant en 2 po x 4 po à l'intérieur du mur préfabriqué. Le principe de fixation de l'équerre métallique est le même que pour celui d'une solive.

4.1.6.4 Clous vrillés

Les clous vrillés de calibre 16d utilisés sont composés des tiges tordues en spirale et de têtes rondes. Selon le site du fabricant, ce type de clous est recouvert d'une couche de zinc appliquée à chaud leur offrant une protection contre la rouille. Toujours selon la même source, ils sont idéaux pour la construction générale, la menuiserie et les travaux de la charpenterie et de plus ils offrent une meilleure rétention et réduisent le fendillement des morceaux de bois. Les propriétés de ces clous sont présentées dans le Tableau 1.

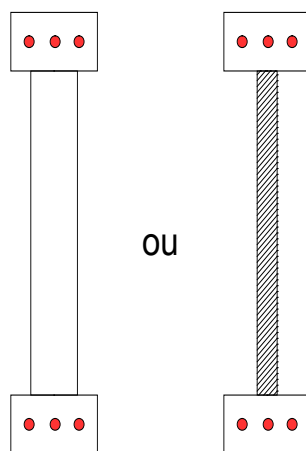


Figure 23. Fixation CV33.

La fixation CV33 (Figure 23) est composée de 6 clous vrillés dont 3 sont plantés dans le 2 po x 3 po du haut de la solive et 3 autres dans celui du bas. Cette fixation n’a pas été retenue pour la suite des essais à cause des faibles résistances observées lors des essais préliminaires.

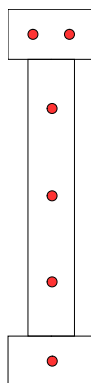


Figure 24. Fixation CV231.

La fixation CV231 (Figure 24) est composée de six clous vrillés installés à l'aide d'un marteau dont deux sont plantés dans le 2 po x 3 po du haut de la solive, trois dans le 2 po x 3 po vertical et un autre dans le 2 po x 3 po du bas. Cette fixation est seulement réalisable sur le côté 2 po x 3 po de la solive, car le côté OSB ne permet pas de fixer les clous du milieu. Cette fixation a été retenue, car elle présentait un potentiel de résistance plus important que la CV33.

4.1.6.5 Vis à bois

Les vis à bois #10 utilisées sont de couleur verte, car elles sont traitées contre la corrosion. Elles sont également approuvées par la certification ACQ (Association de la construction du Québec). Elles sont composées de tiges filetées sur une longueur d'environ 4,3 cm et lisses sur le restant de la longueur. Leurs têtes sont rondes, trompettes avec embout Robertson. Les propriétés de ces vis sont présentées dans le Tableau 2.

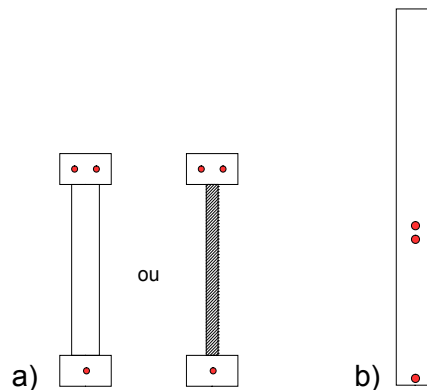


Figure 25. Fixation VB21 pour les solives (a) et pour le mur préfabriqué (b).

La fixation VB21 (Figure 25) est composée de 3 vis à bois #10 dont 2 sont installées dans le 2 po x 3 po du haut de la solive et 1 autre dans celui du bas. Cette fixation a été retenue pour la suite des essais, car tout en étant économique, elle a permis d'observer des résistances intéressantes lors des essais préliminaires.

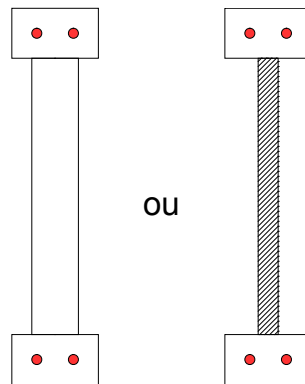


Figure 26. Fixation VB22.

La fixation VB22 (Figure 26) est composée de 4 vis à bois #10 dont 2 sont installées dans le 2 po x 3 po du haut de la solive et 2 autres dans celui du bas. Cette fixation n'a pas été retenue même si les résistances observées lors des essais préliminaires avec cette fixation étaient bien supérieures à la résistance minimale exigée par le CSTC. Les essais préliminaires avec la fixation VB21 ont prouvé que des résistances similaires pouvaient être obtenues avec moins des vis.

4.1.6.6 Tirefond

Les tirefonds utilisés sont des boulons en zinc composés de tiges partiellement filetées et de têtes en forme hexagonale de 0,562 pouce d'un coin à l'autre. Ils peuvent être utilisés dans la plupart des projets de construction en bois. Les propriétés de ces tirefonds sont présentées dans le Tableau 2.

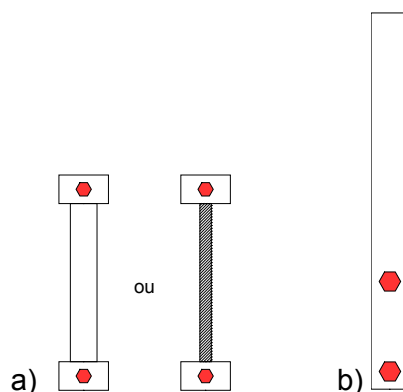


Figure 27. Fixation T11 pour les solives (a) et pour le mur préfabriqué (b).

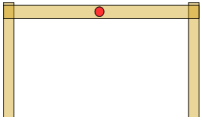
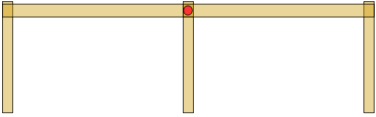
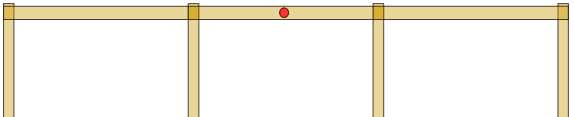

La fixation T11 (Figure 27) est composée de 2 tirefonds vissés à l'aide d'une clé à tête hexagonale dont 1 est fiché dans le 2 po x 3 po du haut de la solive et l'autre dans celui du bas. Des prétrous de diamètre $\frac{1}{4}$ po sont réalisés à l'aide d'une perceuse avant d'installer les tirefonds. Le diamètre du prétrou a une influence sur la résistance à l'arrachement des tirefonds : s'il est trop petit, il y a un risque de fendillement du 2 po x 3 po et s'il est trop gros, le pas de vis du tirefond ne va pas mordre pleinement dans le bois, ce qui diminuera la résistance à l'arrachement. L'influence du diamètre du prétrou n'est pas analysée lors des essais de laboratoire et un diamètre constant de prétrou de $\frac{1}{4}$ po a été conservé pour tous les essais, ce qui correspond à la recommandation de Rammer (2010) : environ 70 % du diamètre de la vis pour les bois tendres.

Avec cette fixation, les deux extrémités de la solive peuvent être utilisées. Dans la mesure du possible, l'extrémité en 2 po x 3 po a été privilégiée plutôt que celle avec l'âme en OSB, car elle permet d'obtenir une meilleure épaisseur d'enrobage du boulon par le bois.

4.1.7 Configurations d'essais

Le Tableau 3 présente les diverses configurations d'essais considérées pour les solives ajourées et le mur préfabriqué. Les configurations 1 travée et 2 travées-montant sont anticipées être les moins résistantes. Les configurations comprenant trois travées servent à représenter un garde-corps continu et devraient donner des résistances plus élevées. Les montants sont des 2 po x 4 po en SPF.

Tableau 3. Configuration d'essais pour les solives ajourées et le mur préfabriqué

Configuration	Point d'application de la charge : ●
1 travée (1T)	
2 travées - Montant (2T-M)	
3 travées - travée centrale (3T-C)	
3 travées - travée de rive (3T-R)	

4.1.8 Matrice d'essai pour les solives

Le Tableau 4 présente les facteurs et niveaux considérés pour les essais en laboratoire. La variable dépendante considérée est la force horizontale mesurée.

Tableau 4. Facteurs et niveaux considérés pour les solives

Facteurs	Niveaux	Type	Valeurs des niveaux
Hauteur GC	2	continu	1 m, 1,2 m
Configuration	4	nominal	1T, 2T-M, 3T-C, 3T-R
Hauteur solive	4	nominal	9,5 po, 12 po, 14 po, 16 po
Fixation	8	nominal	VB21, CA31, CL31, CL31 - E, CL22 - AF, CL33 - AF, CV231, T11

Le Tableau 5 montre la matrice des essais qui ont été menés sur les garde-corps en bois fixés sur des solives ajourées. Chaque type d'essais a été répliqué un minimum de deux fois afin de déterminer la variabilité de résistance pour un type d'essai donné (donc chaque type d'essai est réalisé au moins trois fois). Dans certains cas, lorsque des défauts de mise en place ont été observés (clou qui ressort du 2 po x 3 po de la solive, deux clous installés dans le même trou, fendillement du 2 po x 3 po lors du coulage, etc.), un quatrième essai a été réalisé.

La configuration 2T-M étant considérée comme le cas le plus défavorable, seules les méthodes de fixation donnant les meilleurs résultats ont été testées dans ces cas-ci. Les configurations avec trois travées étant considérées comme offrant le plus de résistance, seules quelques configurations ont été testées afin de valider cette hypothèse. Enfin, la configuration à une seule travée a servi de référence, car elle offre un bon compromis entre la probabilité d'occurrence (la probabilité qu'un travailleur s'appuie sur une travée plutôt que directement sur le montant est plus grande) et la résistance sous-estimée par rapport à la configuration à trois travées (représentant le cas d'un garde-corps continu).

Le cas le plus défavorable sur le plan de la résistance des garde-corps est celui où le bras de levier par rapport au point de fixation est le plus grand. Une hauteur de garde-corps de 1,2 m a donc été considérée dans la majorité des essais, soit la limite fixée par le CSTC. Quelques essais avec des garde-corps de 1 m de hauteur (limite inférieure du CSTC) ont été effectués afin de valider cette hypothèse.

Tableau 5. Matrice d'essais pour les solives ajourées

Solives de 9,5 po/12 po/14 po/16 po				
Configuration	1T	2T-M	3T-C	3T-R
ESSAIS	CA31 - 1,2 m		CA31 - 1,2 m	CA31 - 1,2 m
	CL31 - 1,2m	CL31 - 1,2m	CL31 - 1,2m	CL31 - 1,2m
	CA31 - 1m			
	CL31 - 1m			
	VB21 - 1,2m	VB21 - 1,2m		
	CV231 -1,2m			
	T11 - 1,2m			
	CL31 - E -1,2m	CL31 - E -1,2m		
	CL22 - AF - 1,2m	CL22 - AF - 1,2m*		
	CL33 - AF - 1,2m	CL33 - AF - 1,2m		

*12 po uniquement

4.1.9 Matrice d'essai pour le mur préfabriqué

Le tableau 6 présente les facteurs et niveaux considérés pour les essais sur le mur préfabriqué. La variable dépendante considérée est la force horizontale mesurée.

Tableau 6. Facteurs et niveaux considérés pour le mur préfabriqué

Facteurs	Niveaux	Type	Valeurs des niveaux
Configuration	3	nominal	1T, 2T-M, 3T-C
Hauteur de fixation	3	ordinal	12 po, 16 po, 24 po
Fixation	5	nominal	VB21, CA31, CL31, CL31 - E, T11

Les configurations d'essais pour les garde-corps fixés sur un mur préfabriqué sont présentées dans le Tableau 7. Chaque type d'essai est répliqué 2 fois (donc 3 essais en tout) sur chacune des trois hauteurs de fixation (12 po, 16 po et 24 po). D'autres variables telles que le nombre des travées ou le point de chargement sont étudiées. Au total, 98 essais ont été réalisés en laboratoire.

Tableau 7. Matrice des essais sur le mur préfabriqué

Hauteur de fixation : 12, 16 et 24 po	
Configuration	Fixation
1T	VB21
	CL31
	CA31
	T11
	CL31 - E*
2T-M	VB21
	CL31
	CA31
	T11
	CL31 - E
3T-C	CL31*

* seulement 12 et 24 po

La hauteur de fixation des garde-corps sur le mur préfabriqué désigne la distance entre le clou planté le plus bas dans le montant d'un garde-corps et le clou le plus haut de la série des clous qui composent la matrice d'essai. De même, pour une fixation à base de vis, cette distance est mesurée entre la vis la plus basse dans le montant d'un garde-corps et celle vissée la plus haute de la série des vis qui composent la matrice d'essai. Trois hauteurs de fixation sont utilisées dans cette étude : 12 po, 16 po et 24 po. La Figure 28 présente le cas d'un garde-corps à une travée, fixé au mur préfabriqué à l'aide la fixation VB21 et pour une hauteur de 12 po entre la vis du haut et celle du bas.

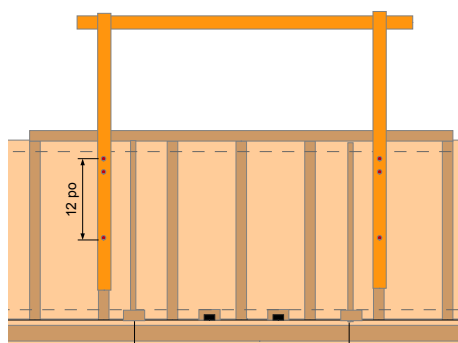


Figure 28. Garde-corps fixé à l'aide de la fixation VB21 et avec une hauteur de fixation de 12 po.



Figure 29. Garde-corps installé sur le mur préfabriqué, fixation CL31 et configuration 3T-C, avec espacement des clous de 24 po.

4.2 Essais de terrain : garde-corps métalliques fixés sur des parapets de bâtiments existants

4.2.1 Fixation des garde-corps

Trois types de vis ou de tirefonds ont été utilisés pour fixer les garde-corps aux parapets des deux bâtiments d'essai. Pour le bâtiment de 2013, les tirefonds et vis autotaraudeuses ont été utilisés, tandis que pour le bâtiment de 2008, les trois types de fixation ont été employés pour les garde-corps.

4.2.1.1 Vis noire

Ce type de vis a été recommandé pour les essais par le conseiller en prévention de la mutuelle de prévention Gestion d'entreprise en santé et sécurité (GESTESS), car il s'agit, selon son expérience, du type de vis le plus courant sur les chantiers de couvreurs. Ce sont des vis autotaraudeuses #14 de 0,25 po de diamètre, 1,75 po de longueur, et munies d'une tête Philips. Le filetage comporte 14 filets par pouce et la tête taraudeuse a une longueur de 5 mm environ. Elles ont un fini en oxyde noir et sont souvent utilisées par les entreprises en raison de leur coût nettement plus bas que celui des tirefonds (5 cents contre 30-35 cents). La Figure 30 montre ce type de vis qui a été utilisé pour les essais sur le bâtiment de 2008.

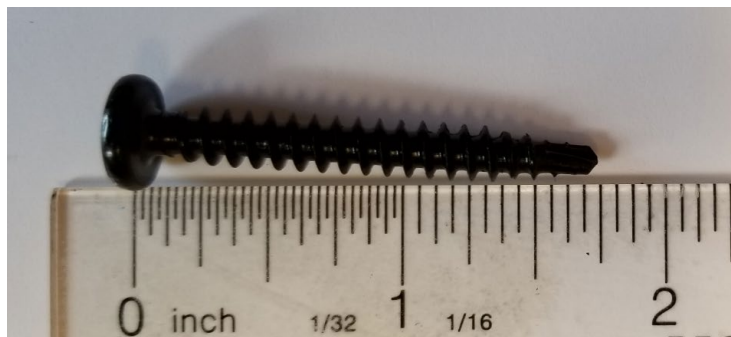


Figure 30. Vis noire.

4.2.1.2 Vis autotaraudeuse

Ce type de vis est couramment utilisé sur les chantiers de couverture par les travailleurs de l'entreprise partenaire. Ce sont des vis #12 (diamètre légèrement inférieur à ¼ de po) et une longueur de 2 po. Le filetage comporte 14 filets par pouce, la tête taraudeuse a une longueur de 9 mm environ, et ces vis sont munies d'une tête hexagonale (Figure 31).

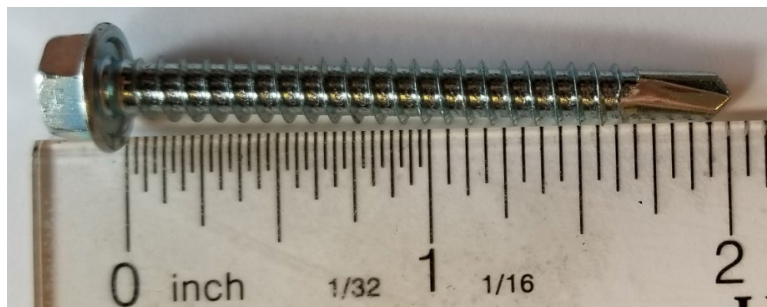


Figure 31. Vis autotaraudeuse.

4.2.1.3 Tirefonds

Le troisième type de fixation utilisé pour les essais est un tirefond dont l'usage est recommandé pour la fixation des garde-corps 2. Ces tirefonds ont été livrés avec les garde-corps. Ils ont un diamètre de 0,25 po et une longueur de 2,5 po. Le filetage comporte 10 filets par pouce et est présent sur toute la longueur. Ces tirefonds sont munis d'une tête hexagonale (Figure 32).

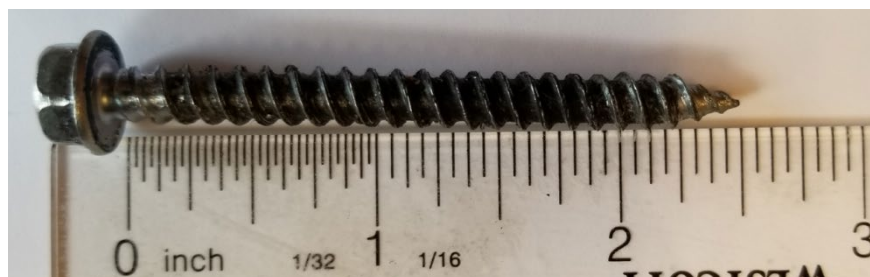


Figure 32. Tirefonds.

4.2.2 Parapets

Quatre différents parapets ont été utilisés lors des essais et sont présentés dans cette sous-section. Trois de ces parapets étaient situés sur le bâtiment construit en 2013, et le dernier était présent sur le bâtiment de 2008. Afin d'éviter des dommages trop importants aux les bâtiments de l'entreprise partenaire, des coupes complètes des parapets n'ont pas été effectuées. La caractérisation de chacun des parapets présente donc certaines limites, mais représente un cas réaliste de fixation des garde-corps sur les chantiers de couverture : les travailleurs ne connaissent généralement pas précisément le substrat dans lequel ils fixent leurs garde-corps ni l'état de vieillissement ou de pourrissement des parapets.

4.2.2.1 Parapet 1 - bâtiment de 2013

Le premier parapet est situé au centre de la toiture du bâtiment. Il sert de démarcation entre deux sections du toit dont la membrane d'étanchéité diffère. Il s'agit d'un parapet dont la partie métallique (ferblanterie) est dissymétrique : un côté est droit, tandis que le côté opposé est droit sur une dizaine de centimètres puis présente une pente à 45° environ (Figure 33). Il est constitué de contreplaqué d'épaisseur inconnue et de montants en 2 po x 4 po probablement. La largeur du parapet est de 15 cm.



Figure 33. Parapet 1.

4.2.2.2 Parapet 2 - bâtiment de 2013

Le parapet 2 (Figure 34) est situé à l'extrémité de la toiture. Il s'agit en fait d'un panneau isolant qui dépasse du toit. Ces panneaux isolants sont généralement constitués d'une fine couche de contreplaqué sur les côtés et le dessus, et de matériau isolant pour leur composition interne. La largeur de ce parapet était légèrement supérieure à celle du parapet 1 (16 cm) tandis que sa hauteur était variable en raison de la pente de la toiture.

Des tests d'humidité ont été faits quelques semaines avant de procéder aux essais dans la même zone. L'humidité a été mesurée à l'aide d'un appareil Tramex *Moisture Encounter Plus* qui mesure l'humidité en se basant sur l'impédance. Le fabricant indique que l'amplitude de mesure de cet appareil s'étend de 5 % à 30 % d'humidité pour le bois, et que la lecture est valable pour des épaisseurs allant jusqu'à 1 po. Dans les sections verticale et horizontale, l'humidité était la même, soit 7 %. Le bois constituant les parapets est donc très sec et une coupe exploratoire montre qu'il est sain (Figure 35).

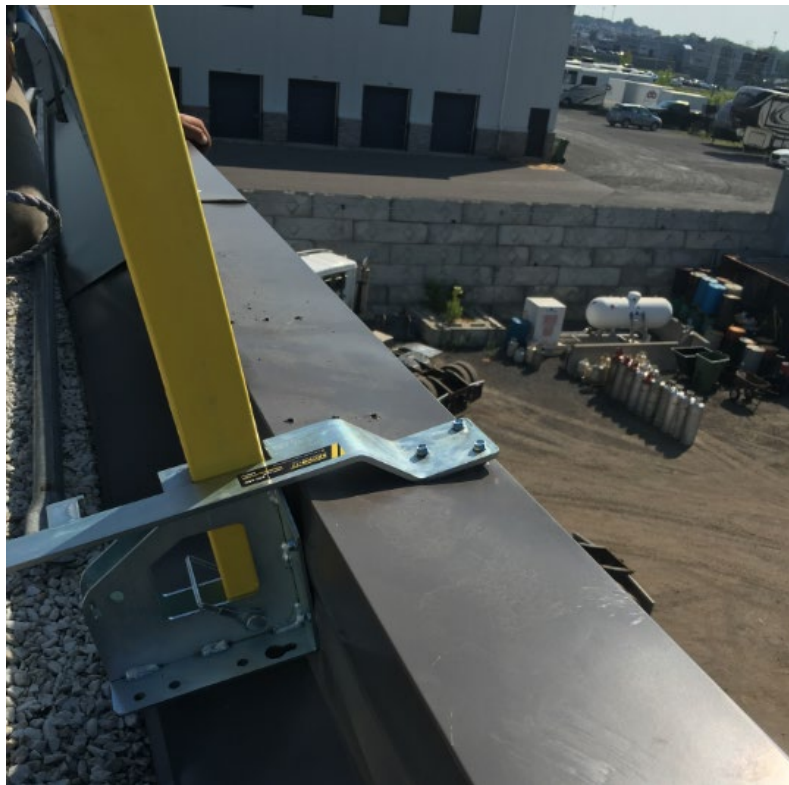


Figure 34. Parapet 2 avec garde-corps 3.



Figure 35. Coupe exploratoire et mesure d'humidité à proximité du parapet 2.

4.2.2.3 Parapet 3 - bâtiment de 2013

Le dernier parapet sur lequel des essais ont été réalisés sur le bâtiment de 2013 est de type sandwich de grandes dimensions : 30 cm de largeur et 60 cm de hauteur environ. Le parapet est constitué de feuilles de contreplaqué de 5/8 po (Figure 36) et d'une structure probablement réalisée en 2 po x 10 po.

Des tests d'humidité ont été faits quelques semaines avant de procéder aux essais dans la même zone. Dans la section verticale, l'humidité était évaluée à 7 % alors qu'elle atteignait 10 % dans la partie horizontale. Le bois constituant les parapets est donc très sec et une coupe exploratoire montre qu'il est sain (Figure 36).



Figure 36. Coupe exploratoire et mesure d'humidité du parapet 3.



Figure 37. Parapet 3 après réparation avec membrane d'étanchéité.

4.2.2.4 Parapet 4 - bâtiment de 2008

Le parapet 4 est situé à l'extrémité de la toiture du bâtiment de 2008. Il s'agit en fait d'un panneau isolant qui dépasse du toit. Ces panneaux isolants sont généralement constitués d'une fine couche de contreplaqué sur les côtés et le dessus tandis que leur composition interne est constituée de matériau isolant. Ce parapet présentait une largeur légèrement inférieure à celle du parapet 1 (14 cm, ce qui empêche de fixer les 6 vis pour les garde-corps 2, lorsque la base est posée sur le dessus du parapet) et une hauteur variable (due à la pente de la toiture, voir Figure 38).

Des tests d'humidité ont été réalisés quelques semaines avant de procéder aux essais dans la même zone. Dans la section verticale, l'humidité était évaluée à 7 %. La coupe exploratoire montre qu'aucun bâti de bois n'est présent à cet endroit (Figure 39). Ce parapet constituera donc la borne inférieure de résistance pour les garde-corps.



Figure 38. Hauteur variable du parapet 4 due à la pente de la toiture.



Figure 39. Coupe exploratoire et mesure d'humidité à proximité du parapet 4.

4.2.3 Garde-corps à l'étude

Les garde-corps utilisés lors des essais sur les deux bâtiments sont présentés dans cette sous-section. Parmi les trois garde-corps utilisés, deux d'entre eux avaient fait l'objet d'essais au laboratoire de Polytechnique Montréal (Lan et Daigle, 2011). Chacun de ces garde-corps a été fixé selon deux méthodes différentes.

Pour tous les essais, des lisses d'acier de 1-5/8 po (42,3 mm) de diamètre ont été utilisées pour le rail supérieur et des lisses d'acier de 1,25 po (31,8 mm) de diamètre ont servi pour le rail intermédiaire.

La résistance mécanique de ces garde-corps ne faisait pas l'objet d'une question de recherche dans cette activité, car, d'une part, deux des garde-corps avaient déjà été validés en laboratoire, et que, d'autre part, le dernier (garde-corps 3) utilise une section HSS (*hollow structural section*) avec une inertie en flexion élevée (travail sur l'axe fort). Les essais se sont donc focalisés sur les structures d'accueil des garde-corps, soit les quatre parapets différents, et les types de fixation (vis ou tirefonds) utilisés.

4.2.3.1 Garde-corps 1

Les garde-corps 1 sont modulaires et peuvent être utilisés soit avec des serre-parapets (étau), soit avec une plaque horizontale et une autre verticale (support mural). La documentation du fabricant mentionne que « Les poteaux garde-corps peuvent s'installer seuls, avec les étaux ou avec les supports muraux ».

Notons que par rapport à la version testée en laboratoire, la plaque de fixation horizontale a été modifiée par le manufacturier (Figure 40). Elle est maintenant plus large (15 cm x 30 cm). La dimension du tube carré pour le poteau a été augmentée également : 1,5 po x 1,5 po (et 1 po x 1 po pour la partie basse permettant de s'enficher dans le serre-parapet).

La documentation du manufacturier mentionne qu'il faut utiliser des tirefonds de 0,25 po (6 mm) de diamètre par 1,5 po (38 mm) de longueur minimum pour la fixation de ces garde-corps. Lorsque l'on utilise le serre-parapet, il y a 4 vis en façade du parapet, et 2 à l'arrière (Figure 40). Lorsque l'on utilise la plaque de fixation horizontale, il faut utiliser 6 vis (Figure 41).

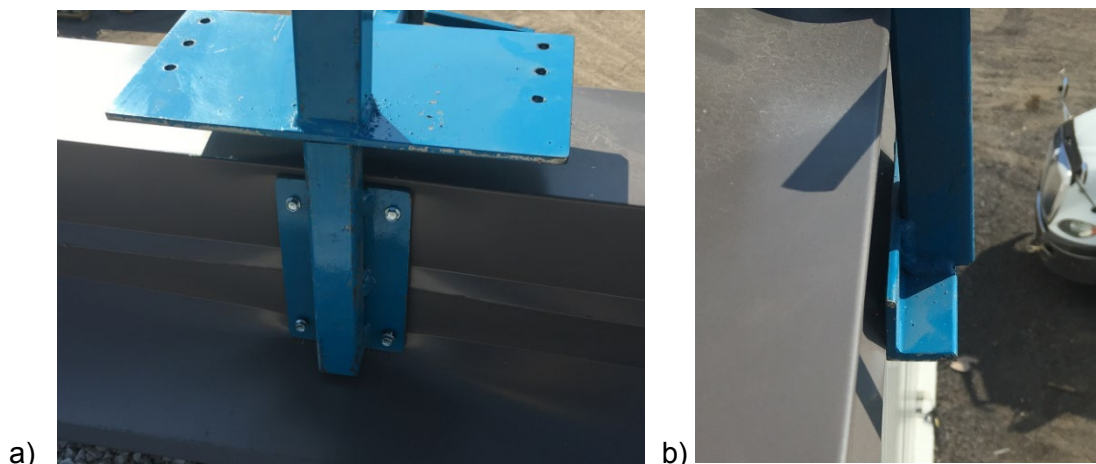


Figure 40. Garde-corps 1 testé sur le terrain, (a) fixation en façade du parapet (4 vis), (b) avec le serre-parapet.



Figure 41. Garde-corps 1 testé sur le terrain, fixation sur la face horizontale du parapet avec 6 vis.

4.2.3.2 Garde-corps 2

Les garde-corps 2 sont modulaires et peuvent être utilisés avec un stabilisateur de poteau qui est soit une pièce tubulaire en acier en forme de L (Figure 42, fixée avec 2 vis), soit une plaque horizontale venant enserrer le montant du garde-corps (Figure 43, fixée avec 3 vis). Dans cette étude, les deux fixations ont été utilisées, mais dans le cas des essais réalisés à Polytechnique Montréal (Lan et Daigle, 2011), seul le stabilisateur de poteau de type plaque métallique avait été testé. La documentation du fabricant mentionne que les pieds de fixation (15 cm x 15 cm) doivent être positionnés à tous les dix pieds et fixés au parapet à l'aide de 6 vis à bois de type tirefond 0,25 po de diamètre ou de 6 vis à métal 0,25 po de diamètre x 2,5 po de longueur selon le type de revêtement.

Les rails supérieurs et intermédiaires peuvent être ajustés en hauteur, ce qui n'est pas le cas des autres garde-corps testés.



Figure 42. Garde-corps 2 avec stabilisateur de poteau en L.



Figure 43. Garde-corps 2 avec stabilisateur de poteau de type plaque métallique.

4.2.3.3 Garde-corps 3

Les garde-corps 3 sont modulaires et peuvent être utilisés avec un stabilisateur de poteau soit une plaque horizontale venant enserrer le montant du garde-corps (en utilisant 3 vis) ou avec un serre-parapet (Figure 44). Le serre-parapet utilise 2 vis sur la face arrière. Dans cette étude, les deux fixations ont été utilisées. La base de montant est modulaire et permet une fixation avec 6 ou 4 vis ou tirefonds. Plusieurs types de montants sont disponibles, selon que l'on souhaite utiliser des lisses d'échafaudage comme lisses des garde-corps ou des 2 po x 4 po en bois. Des bases pour fixation des poutres métalliques sont aussi disponibles.

Les montants du garde-corps 3 font 1 po x 2 po et 48 po de longueur. Les plaques métalliques du pied de fixation mesurent 4 po x 6 po et 4 po x 5 po respectivement. Le montant est plus léger que celui des garde-corps 1 (9,5 lb avec le pied de fixation par rapport à 19,5 lb pour le garde-corps 1). La plaque horizontale et le serre-parapet sont de plus grandes dimensions que leurs équivalents pour les garde-corps 1 et 2. La plaque horizontale fait environ 16 po de longueur pour une épaisseur de ¼ po (par rapport à 1/8 po pour le garde-corps 2).

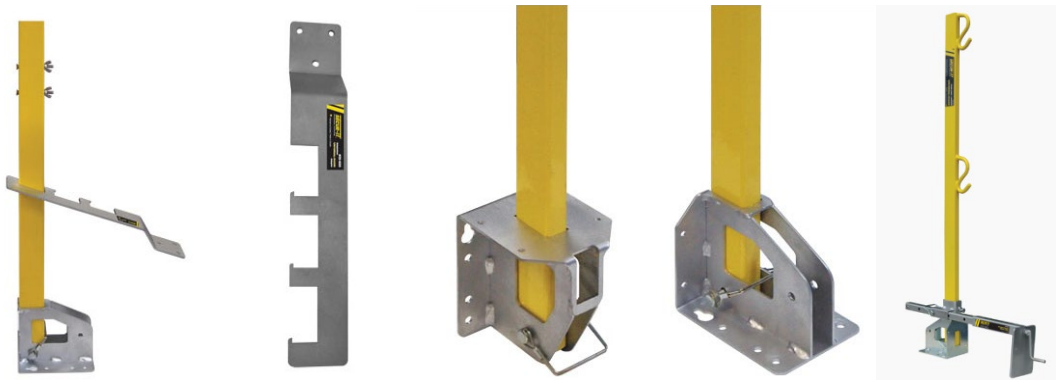


Figure 44. Garde-corps 3 avec plaque de stabilisation, pied de fixation et serre-parapet.

Le stabilisateur de poteau et le serre-parapet semblent très robustes, mais présentent un défaut : ils ne semblent pas appropriés aux parapets de petites dimensions (Figure 45). En effet, pour le parapet 4, l'utilisation du serre-parapet était impossible, et il n'était possible de visser qu'une seule des trois vis prévues pour fixer la plaque de stabilisation du poteau. Ces limites se traduisent par des résistances plus faibles.



Figure 45. Garde-corps 3 installé sur le parapet 4.

4.2.4 Application de la force sur les garde-corps

La principale difficulté des essais *in situ* réside dans l'application des efforts sur les garde-corps. L'installation du côté extérieur du parapet est ce qui est réalisé en réalité sur les chantiers. Afin de vérifier la résistance, il faudrait donc appliquer une force horizontale vers l'extérieur de l'édifice, au risque, en cas de rupture du parapet ou de la fixation du garde-corps, de faire tomber le garde-corps au bas du bâtiment. Cela pose un problème évident de sécurité. Par ailleurs, l'application d'une force de poussée pose plusieurs problèmes de faisabilité : il faut avoir une membrure suffisamment rigide pour éviter le risque de flambement; l'horizontalité de cette membrure est difficile à évaluer, si bien qu'un effort vers le haut pourrait être transmis à la lisse supérieure du garde-corps.

Pour ces différentes raisons, les essais ont été réalisés avec un garde-corps installé du côté intérieur du bâtiment, et les forces ont été appliquées à l'aide d'une longe sur la lisse supérieure (Figure 46). En cas de rupture de la fixation du garde-corps, celui-ci tomberait sur la toiture, sans générer de risque pour les personnes circulant à proximité du bâtiment.

La résistance mesurée du côté intérieur du parapet est représentative de celle qui serait obtenue du côté extérieur du parapet tant que celui-ci présente une construction interne symétrique, ce qui est notamment le cas des parapets de type sandwich qui ont été testés pour les deux bâtiments.

L'inclinaison de la longe permet de connaître précisément les forces verticale et horizontale appliquées sur la lisse supérieure. L'objectif n'est pas d'outrepasser le point de rupture du garde-corps, mais de vérifier que les forces minimales prescrites par le CSTC sont atteintes sans abandon de charge, de rupture ou d'amorce de rupture. Le schéma de principe est présenté à la Figure 46.

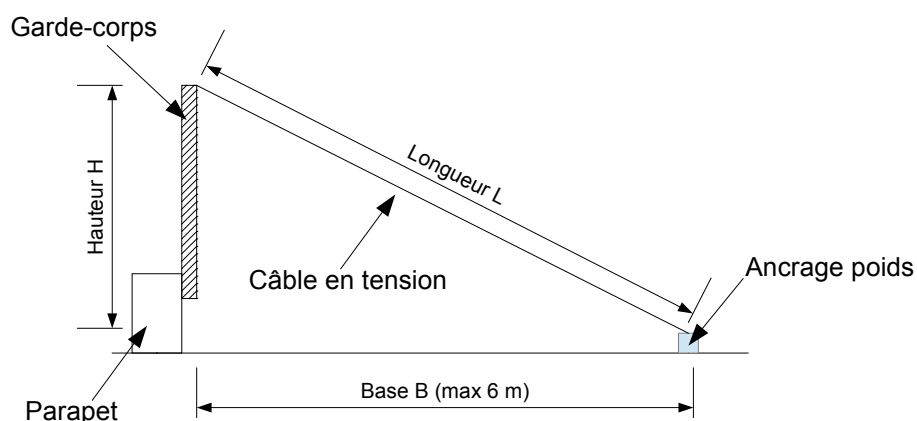


Figure 46. Application de la force sur le garde-corps *in situ*.

Un ancrage poids de type Weightanka (Figure 47), est posé sur le toit du bâtiment afin de pouvoir appliquer une force de tension sur le garde-corps. L'avantage de cet ancrage poids est qu'il ne cause pas de dommage à la toiture. Par ailleurs, il a également servi de point d'ancrage lors de la mise en place des garde-corps, utilisé en conjonction avec un enrouleur-dérouleur. La force de tension dans la longe est augmentée progressivement grâce à un treuil manuel de 900 lb, et elle est mesurée à l'aide d'une cellule de charge avec enregistrement en temps réel (fréquence de 10 Hz) sur un ordinateur.

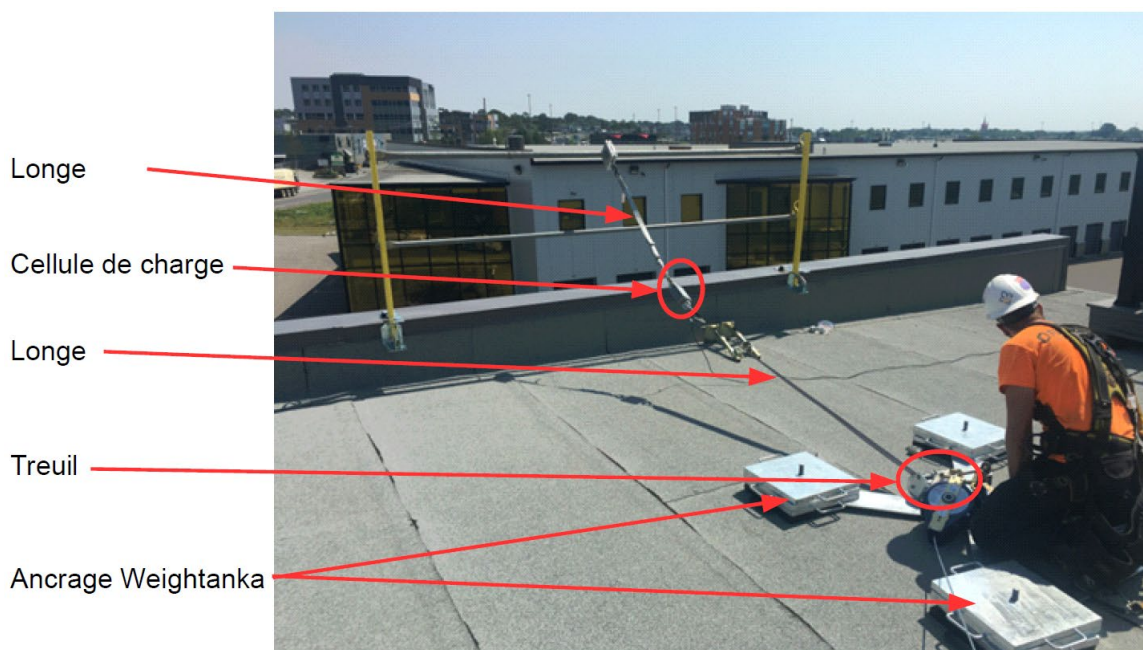


Figure 47. Système d'application de la charge sur le garde-corps

L'angle de la longe inclinée est calculé en prenant l'arc tangente de la distance verticale (hauteur H sur la Figure 46) divisé par la distance horizontale (base B sur la Figure 46). La hauteur H est calculée en mesurant la hauteur de la lisse supérieure du garde-corps par rapport à la toiture et en retranchant 22 cm, ce qui correspond à la hauteur de fixation du treuil pour appliquer la charge oblique.

5. RÉSULTATS DES ESSAIS RÉALISÉS EN LABORATOIRE ET DISCUSSION

5.1 Garde-corps en bois fixés sur des solives ajourées

Un total de 262 essais a été réalisé sur des solives ajourées : 58 sur les solives de 9,5 po, 83 sur les solives de 12 po, 62 sur les solives de 14 po et 59 sur les solives de 16 po. Les essais sur les solives de 12 po sont plus nombreux, car c'est sur ce type de solives que les essais préliminaires ont été réalisés. Ceux-ci ont permis d'ajuster la matrice d'essai finale avec les différents types de fixation. Outre les essais préliminaires, avec deux répliques pour chaque configuration et type de fixation, il devait y avoir 54 essais pour chaque hauteur de solive (18 configurations-fixation x 3 essais). Le nombre d'essais pour chaque hauteur de solive est finalement plus élevé, car certains essais ont été repris, notamment dans le cas où un défaut de fixation était identifié : fendillement du 2 po x 3 po, clou non planté dans le 2 po x 3 po ou dépassant en dessous, clou planté dans un nœud, etc. Les résultats détaillés pour chaque essai sont présentés à l'annexe A. Au total, en retirant les essais préliminaires et les essais ratés, 238 essais sont considérés pour l'analyse statistique.

5.1.1 Exemple de résultats d'essais

Cette sous-section présente les résultats des essais N.79 à N.81 effectués en date du 30 mai 2018. Ces essais sont réalisés sur un garde-corps de 1,2 m de haut dans la configuration 1T. Les montants sont assemblés sur des solives de 9,5 po à l'aide d'une fixation CL22-AF.

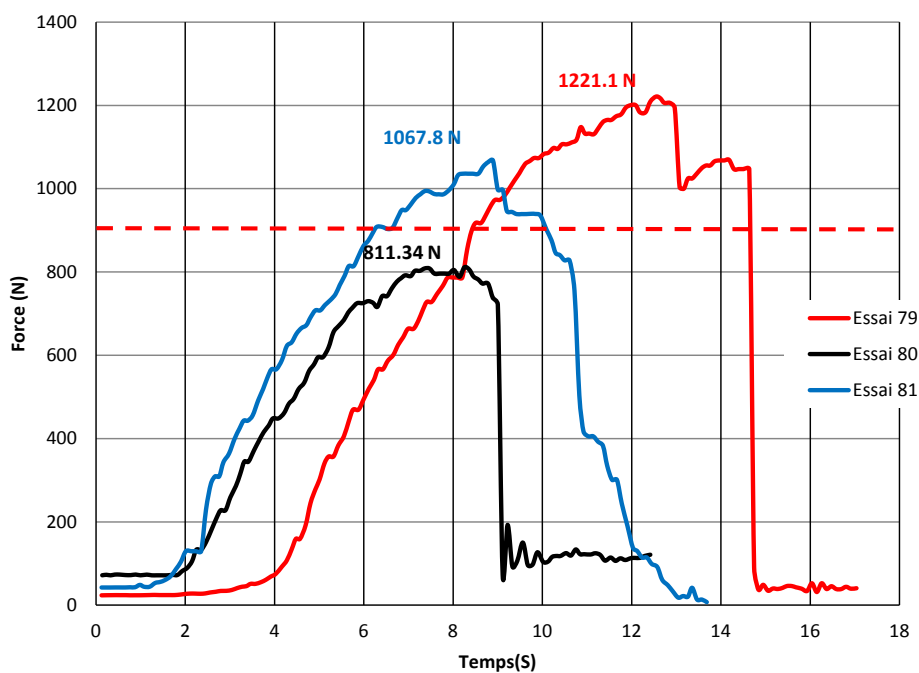


Figure 48. Résultats des essais 79 à 81.

Seule la force horizontale obtenue à l'essai N.80 est inférieure aux 900 N exigés par le CSTC. La moyenne des forces est de 1033 N et l'écart-type est de 207 N. La présence des deux sommets sur la courbe de la force horizontale de l'essai N.79 est expliquée par le fait que l'arrachement du montant droit était précédé par un fendillement brusque de ce montant dans l'axe des clous ce qui a occasionné une chute de tension dans la sangle qui permet d'appliquer la charge horizontale.

Les tableaux de synthèse des résultats d'essais sur les solives sont présentés à l'annexe A.

5.1.2 Analyse statistique

L'analyse statistique a été réalisée à l'aide d'un logiciel de planification expérimentale : JMP (SAS Institute Inc., 2018). L'analyse a d'abord été faite en considérant toutes les interactions de degré 2. Les interactions non statistiquement significatives ($P > 0,05$) ont été écartées de l'analyse. Il apparaît qu'une seule interaction de degré 2 est significative : hauteur solive * type de fixation (Figure 49 ; Prob. > F = 0,0003). L'analyse de variance (ANOVA) est présentée au Tableau 8 et le test des effets au Tableau 9.

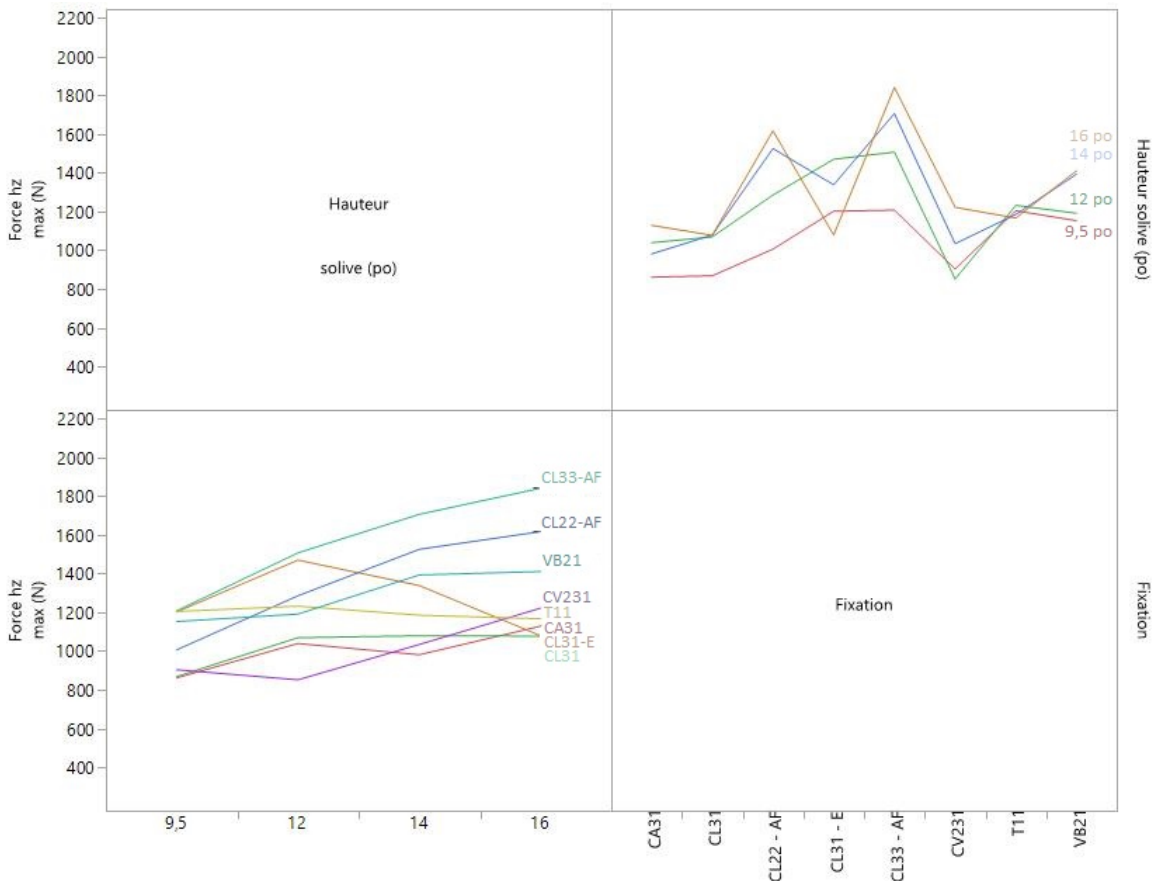


Figure 49. Diagramme d'interaction.

Tableau 8. ANOVA pour les essais sur les solives

Source	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	35	13189425	376841	9,22
Erreur	202	8258978	40886	Prob. > F
Total corrigé	237	21448403		<,0001*

Tableau 9. Test des effets pour les essais sur les solives

Source	Degrés de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
Hauteur garde-corps (m)	1	397758,7	9,73	0,0021*
T. chargée	3	5363542,4	43,73	<,0001*
Hauteur solive (po)	3	1679535,9	13,69	<,0001*
Fixation	7	5462302,3	19,09	<,0001*
Hauteur solive (po)*Fixation	21	2258005,1	2,63	0,0003*

Afin de vérifier si des biais expérimentaux sont intervenus lors de la réalisation des essais, une analyse des résidus a été effectuée. La Figure 50 présente la distribution des résidus en fonction de la force horizontale mesurée et du numéro d'essai. La Figure 51 montre la vérification des quantiles normaux des résidus. Il apparaît que les résidus répondent à une distribution normale, ce qui permet raisonnablement de penser qu'il n'y a pas eu de biais non considéré dans la réalisation des essais, par exemple la vitesse d'application de la charge horizontale, ou l'humidité et la température du laboratoire. Par ailleurs, bien que la randomisation des essais ait été partielle (plusieurs essais successifs sur la même configuration et la même hauteur de solive), cela n'a pas induit de biais dans les résultats.

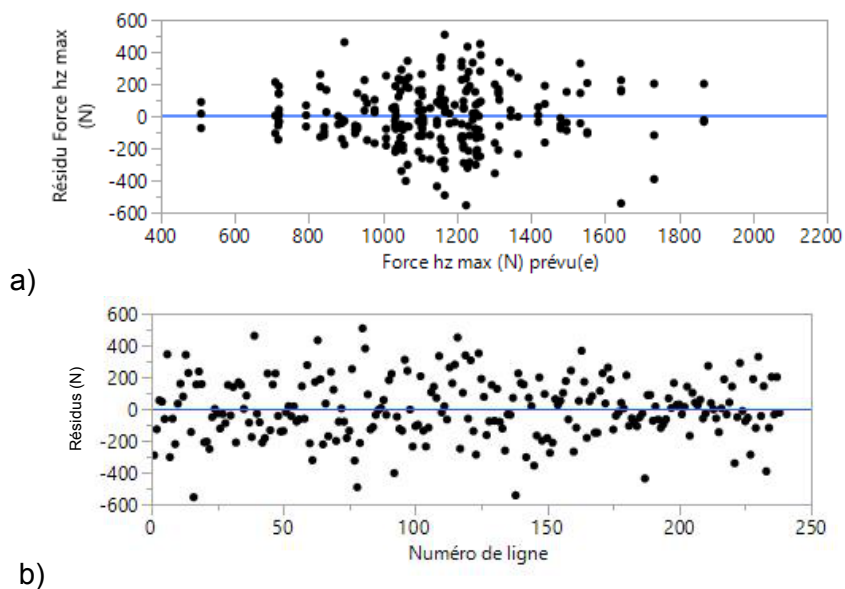


Figure 50. Distribution des résidus en fonction de la force horizontale prévue (a) et du numéro de ligne (numéro d'essai) (b).

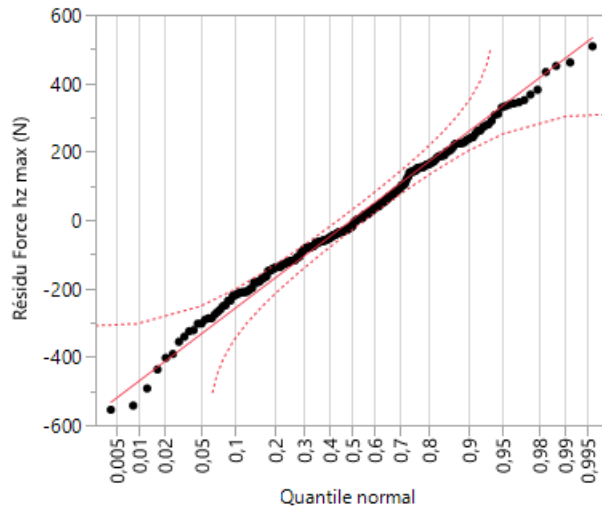


Figure 51. Vérification des quantiles normaux des résidus.

Le Tableau 10 présente l'ajustement du modèle. Le R^2 est relativement peu élevé, et cela est dû à la variabilité des essais avec des montants et solives en bois. Le R^2 calculé pour ces essais est du même ordre de grandeur que ceux obtenus pour des essais d'arrachement direct en traction pour des vis installées dans du bois ou des panneaux de particule (Erdil *et al.*, 2002; Semple et Smith, 2006).

Tableau 10. Ajustement du modèle

R carré	0,61
R carré ajusté	0,55
Racine de l'erreur quadratique moyenne	202,2
Moyenne de la réponse	1140,6
Observations (ou sommes pondérées)	238

5.1.3 Influence de la configuration du garde-corps

La Figure 52 illustre les forces horizontales obtenues pour la fixation CL31 dans différentes configurations d'essai, et pour les quatre tailles de solives. Les résultats montrent que la configuration critique (force atteinte la plus faible) est celle où la force est appliquée directement sur le montant. En général, les configurations à trois travées présentent les résistances les plus élevées, soit pour la force appliquée sur la travée centrale (3T-C), soit pour la force appliquée sur la travée de rive (3T-R).

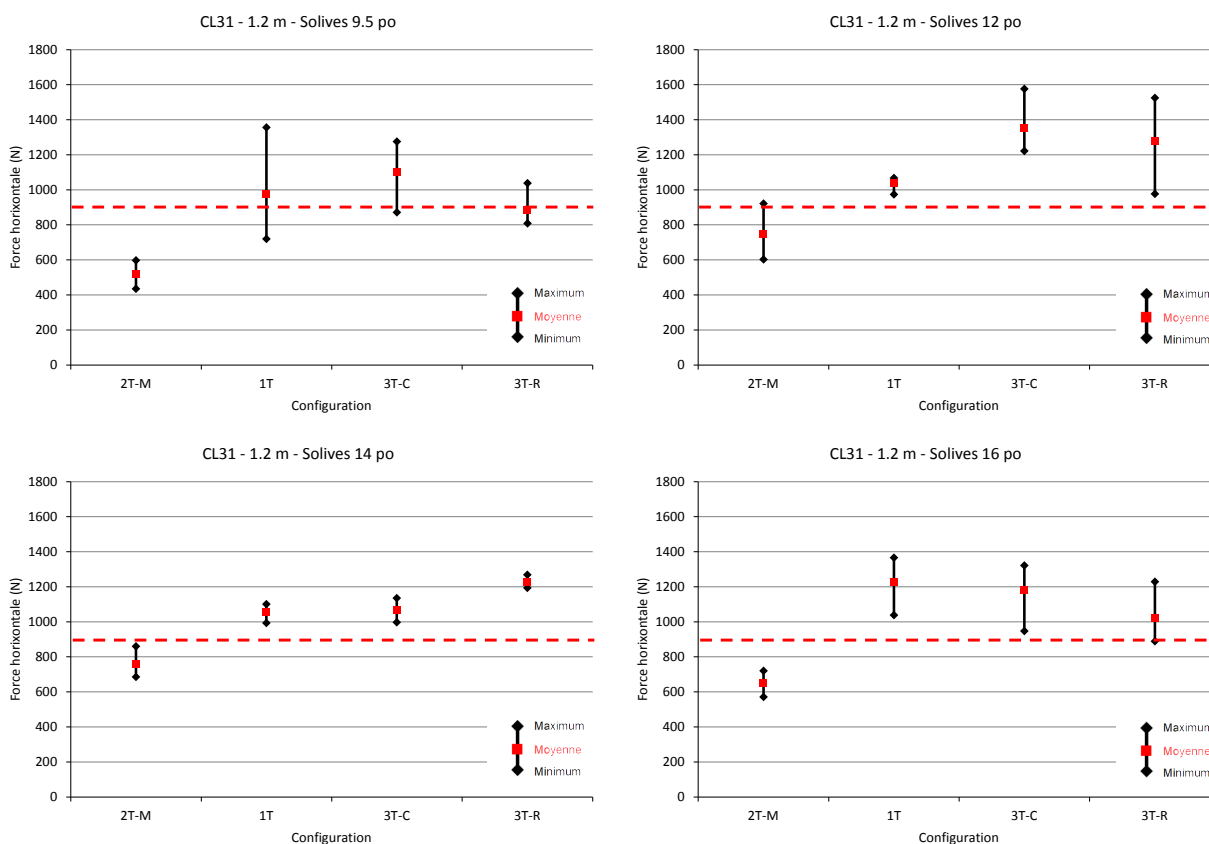


Figure 52. Force horizontale en fonction de la configuration d’essai, pour la fixation CL31.

La Figure 53 présente les forces horizontales obtenues pour la fixation CA31 pour trois des quatre configurations d’essai, et pour les quatre tailles de solives. Les résultats montrent que la configuration dont les résultats sont les plus faibles est généralement la 1T (pas d’essais avec la configuration 2T-M avec la fixation CA31).

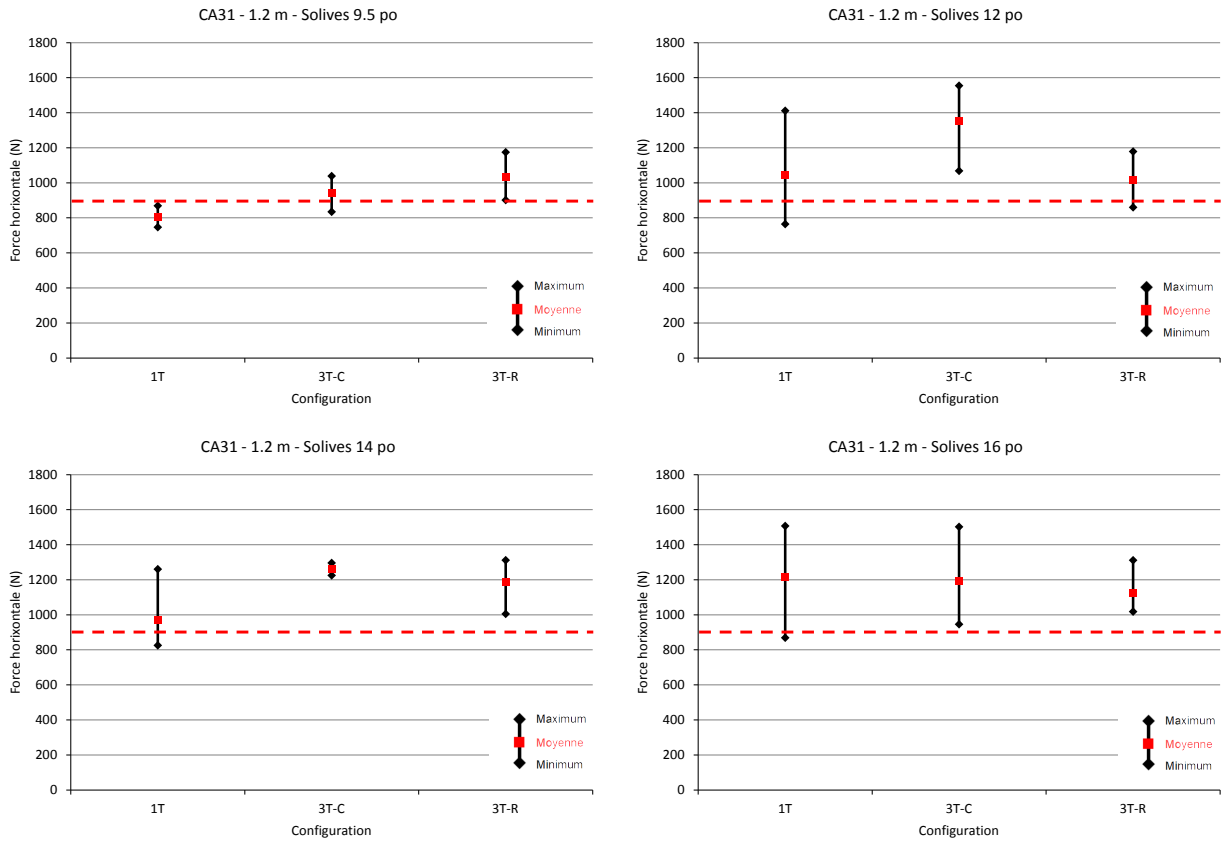


Figure 53. Force horizontale en fonction de la configuration d’essai, pour la fixation CA31.

La Figure 54 permet de comparer les résistances obtenues pour les configurations 2T-M et 1T, pour trois fixations et les quatre hauteurs de solives. Dans tous les cas, les résistances moyennes mesurées pour la configuration 2T-M sont plus faibles que celles obtenues pour la configuration 1T sur une solive de même dimension et pour le même type de fixation.

La configuration 2T-M est donc bien la plus critique. La configuration 3T-C donne des résultats légèrement supérieurs à ceux de la configuration 3T-R.

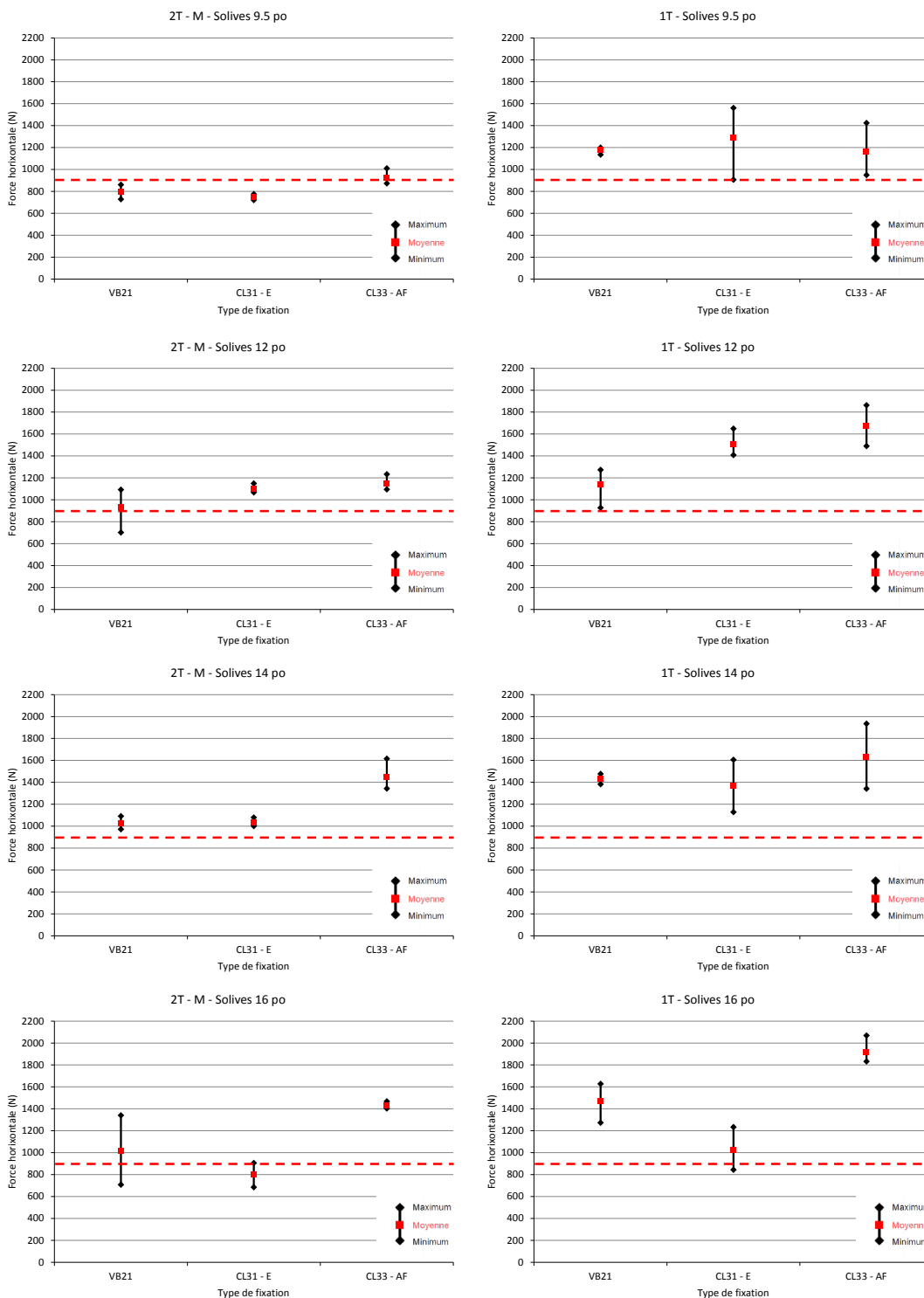


Figure 54. Force horizontale en fonction de la configuration d'essai et du type de fixation, pour différentes hauteurs de solives.

Le Tableau 11 présente les modes de défaillance observés en fonction de la configuration d'essai. Pour la configuration 2T-M et 3T-C, le mode prépondérant de défaillance est la rupture du montant. Dans le cas de la configuration 3T-C, cela s'explique par le fait que chacun des montants de la travée centrale est connecté #à une autre travée. Dans le cas de la configuration 2T-M, cela s'explique par le fait que les fixations testées sont uniquement les plus résistantes, privilégiant ainsi une défaillance par rupture du montant plutôt que par arrachement. Notons que le mode de défaillance « traverse » (les clous ou vis traversent le montant en bois en restant figés dans le 2 po x 3 po de la solive) est relativement peu fréquent.

Tableau 11. Mode de défaillance observé en fonction de la configuration d'essai

Configuration		2T-M	1T	3T-C	3T-R
N ^{bre} essais		54	144	26	25
Arrachement	N ^{bre}	21	51	5	19
	%	39	35	19	76
Rupture	N ^{bre}	28	59	15	4
	%	52	41	58	16
Traverse	N ^{bre}	5	10	6	1
	%	9	7	23	4
Arrêt avant	N ^{bre}	0	24	0	1
	%	0	17	0	4

5.1.4 Influence de la hauteur du garde-corps

À une exception près (solives de 14 po, clous annelés), la Figure 55 montre que les résistances obtenues pour des garde-corps de 1 m de haut sont supérieures à celles mesurées pour des garde-corps de 1,2 m de haut. Ce résultat était attendu : pour un bras de levier plus important, le moment fléchissant à la base du garde-corps sera plus grand.

Il serait donc judicieux de privilégier des garde-corps de 1 m de hauteur sur les chantiers, plutôt que des garde-corps de 1,2 m de hauteur. Ce résultat était anticipé, raison pour laquelle la plupart des essais ont été faits avec des garde-corps de 1,2 m de hauteur, ce qui correspond au cas le plus critique. Ainsi, un type de fixation qui donne des résultats satisfaisants pour un garde-corps de 1,2 m de hauteur sera plus sécuritaire encore pour un garde-corps de 1 m de hauteur.

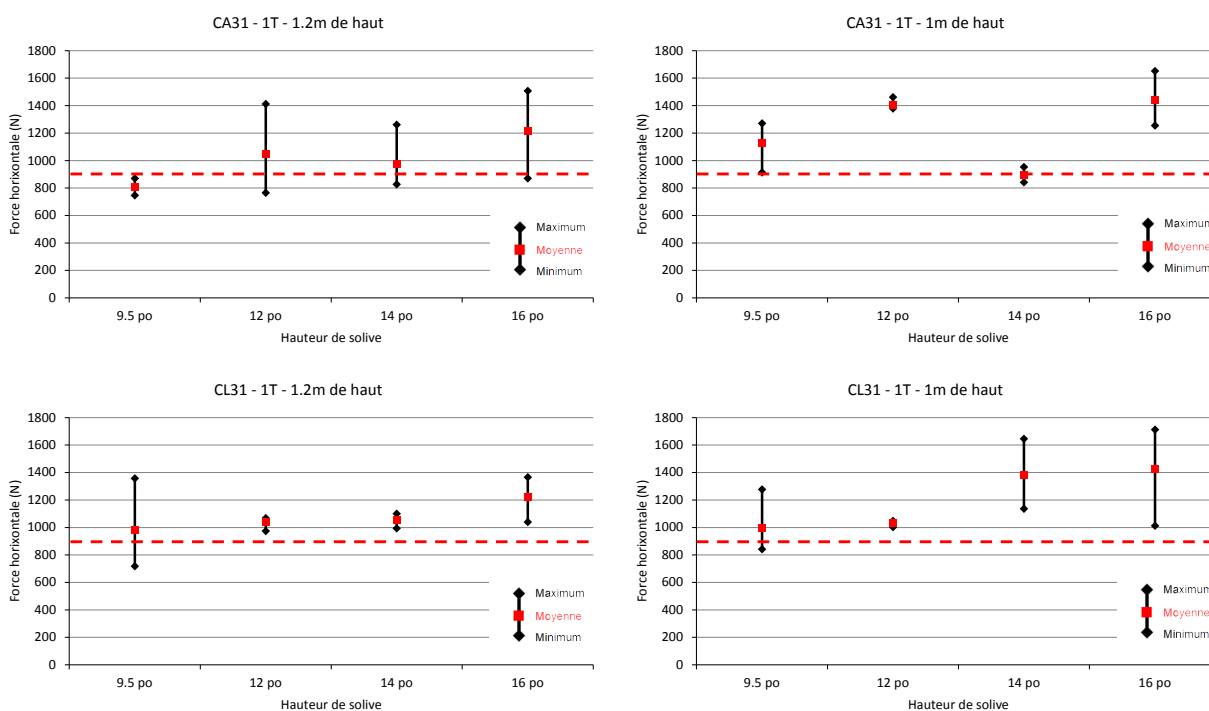


Figure 55. Force horizontale en fonction de la hauteur du garde-corps et de celle de la solive.

Le Tableau 12 présente les modes de défaillance observés en fonction de la hauteur du garde-corps. Dans le cas des garde-corps de 1,2 m, le mode de défaillance prépondérant est l'arrachement, alors que c'est la rupture dans le cas des garde-corps de 1 m de haut. L'écart observé entre les deux modes de défaillance n'est cependant pas suffisamment important pour en tirer une conclusion définitive étant donné le faible nombre d'essais pour chaque mode de défaillance.

Tableau 12. Mode de défaillance observé en fonction de la hauteur du garde-corps

Hauteur de GC		1m	1,2m
N ^{bre} essais		29	35
Arrachement	N ^{bre}	11	19
	%	38 %	54 %
Rupture	N ^{bre}	15	15
	%	52 %	43 %
Traverse	N ^{bre}	1	1
	%	3 %	3 %
Arrêt avant	N ^{bre}	2	0
	%	7 %	0 %

5.1.5 Influence de la hauteur des solives

Le Tableau 13 présente le pourcentage d'échecs lors des essais sur les solives (force horizontale inférieure aux 900 N exigés par le CSTC) en fonction de la hauteur des solives. Remarquons notamment que le taux d'échec est près de trois fois plus élevé pour les solives de 9,5 po que celui pour les solives de plus grandes dimensions.

Tableau 13. Taux d'échec des essais en fonction de la hauteur des solives

Hauteur de solive	9,5 po	12 po	14 po	16 po
Taux d'échec	78,8 %	27,8 %	25,7 %	29,4 %

La Figure 56 expose les valeurs maximales, minimales et moyennes mesurées lors des essais en fonction de la hauteur différente des solives et du type de fixation. Remarquons, de manière générale, que plus les solives sont grandes, plus les résistances sont élevées. Deux types de fixation font exception à cette règle : T11 et CL31 - E.

Le Tableau 14 illustre les modes de défaillance observés en fonction de la hauteur des solives. Pour les solives de 9,5 et 12 po, c'est l'arrachement qui est le mode de défaillance prépondérant.

Tableau 14. Mode de défaillance en fonction de la hauteur des solives

Hauteur solive	9,5 po	12 po	14 po	16 po	
N ^{bre} essais	59	71	61	58	
Arrachement	N ^{bre}	43	33	11	9
	%	73 %	46 %	18 %	16 %
Rupture	N ^{bre}	9	22	39	36
	%	15 %	31 %	64 %	62 %
Traverse	N ^{bre}	7	7	3	5
	%	12 %	10 %	5 %	9 %
Arrêt avant	N ^{bre}	0	9	8	8
	%	0 %	13 %	13 %	14 %

Le Tableau 15 présente les calculs des moments fléchissants à la base du montant (au niveau du plancher) et de la résistance à l'arrachement demandée aux vis ou clous. Remarquons que le moment fléchissant à la base du montant du garde-corps est le même, quelle que soit la hauteur de solive : il se calcule en multipliant la force horizontale par la hauteur du garde-corps (par rapport au plancher). L'équilibre des moments est réalisé par rapport à la base de la solive, le moment au point de rotation est donc la hauteur du garde-corps plus la hauteur de la solive. L'équilibre statique des moments est atteint si la résistance à l'arrachement des clous génère un moment au moins égal, et de sens opposé, à celui généré par la force horizontale. Cette résistance minimale se calcule avec l'équation suivante.

$$R_C \times H_S = F_H \times (H_{GC} + H_S) = M_{PR} \quad (1)$$

Soit
$$R_C = \frac{M_{PR}}{H_S} \quad (2)$$

Tableau 15. Calcul des moments fléchissants à la base du montant et de la résistance à l'arrachement demandée aux vis ou clous

Solive	9,5 po	12 po	14 po	16 po
Force horizontale F_H (N)	1000	1000	1000	1000
Hauteur garde-corps H_{GC} (m)	1,2	1,2	1,2	1,2
Moment à la base du montant $M_B = F_H \times H_{GC}$ (N.m)	1200	1200	1200	1200
Hauteur solive H_S (m)	0,2413	0,3048	0,3556	0,4064
Moment au point de rotation $M_{PR} = F_H \times (H_{GC} + H_S)$ (N.m)	1441,3	1504,8	1555,6	1606,4
Résistance arrachement clous pour équilibre R_C (N)	5973	4937	4375	3953

Notons donc que pour une même force horizontale, le passage d'une solive de 9,5 à 16 po de hauteur permet de diminuer la force d'arrachement imposée aux clous de plus de 30 %. Ainsi, pour une solive de grandes dimensions, la résistance en arrachement des clous ou vis est moins sollicitée, et atteint donc plus rapidement la limite de rupture du montant.

La Figure 56 montre que généralement les solives de plus grandes dimensions offrent une résistance plus importante.

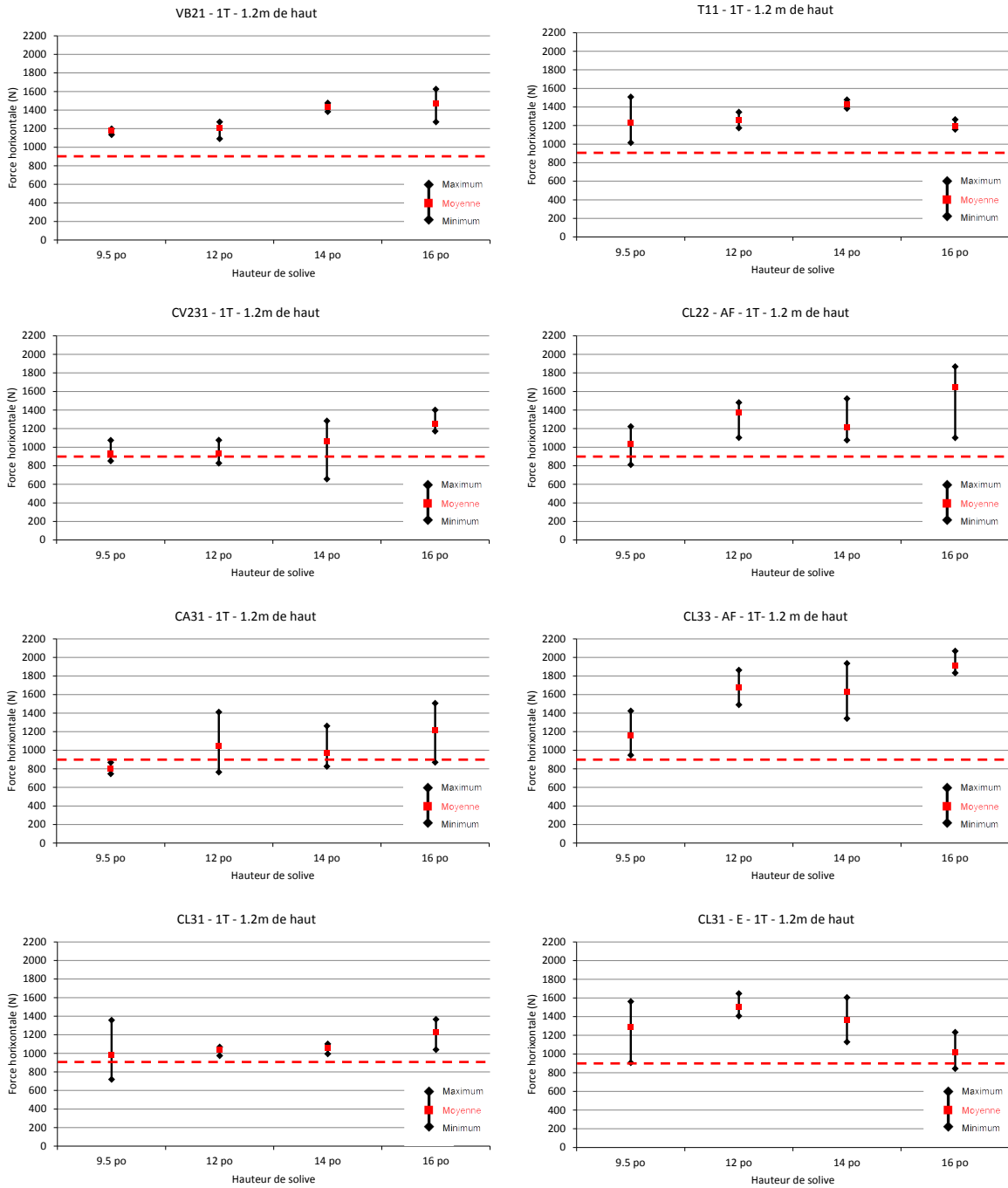


Figure 56. Force horizontale maximale en fonction de la hauteur de la solive et du type de fixation.

5.1.6 Influence du type de fixation

Le Tableau 16 présente le taux d'échec (défaillance avec une force horizontale inférieure à 900 N) pour chaque type de fixation, sur la configuration 1T. Notons que certains types de fixation n'offrent pas des performances intéressantes : CV231, CA31. Les essais sur la configuration 2T-M, plus critique, n'ont donc pas été réalisés sur ces deux types de fixation ni sur la fixation T11, car bien que très efficace, elle est longue à mettre en œuvre (nécessité de percer des prétrous, vissage à la main fastidieux) et sera donc peu pratique pour une utilisation sur les chantiers.

Tableau 16. Taux d'échec en fonction du type de fixation, pour la configuration 1T

Type de fixation	CA31	CL31	VB21	CV231	T11	CL31 - E	CL22 - AF	CL33 - AF
Taux d'échec	50,0 %	15,4 %	0,0 %	41,7 %	0,0 %	7,7 %	13,3 %	0,0 %

Le Tableau 17 expose les modes de défaillance par type de fixation. Notons que l'arrachement n'a jamais été observé pour la fixation VB21, alors que c'est le mode de défaillance prépondérant pour les fixations CA31 et CV231. L'ajout d'une équerre (CL31 - E) à la fixation CL31 permet de faire baisser le pourcentage de défaillance par arrachement au profit de ruptures. Les deux fixations où l'on observe assez régulièrement que la vis traverse le montant en bois sont VB21 et T11. Dans ces cas, la présence de pas de vis est ce qui explique vraisemblablement le fait que les vis et tirefonds restent fixés aux supports et que la tête traverse le montant. En troisième position arrive la fixation CA31 : les clous annelés ont une tête qui présente une surface plus faible que les clous lisses, ce qui pourrait éventuellement expliquer le léger écart observé. Cependant l'écart étant relativement faible, il n'est pas à exclure que ce soit dû aux variations expérimentales plutôt qu'à la surface de la tête.

Tableau 17. Mode de défaillance observé en fonction du type de fixation

Type de fixation	VB21	CA31	CL31	CV231	CL31 - E	T11	CL22 - AF	CL33 - AF
Nbre essais	25	55	71	12	27	14	19	26
Arrachement	N ^{bre}	0	27	31	8	8	12	7
	%	0 %	49 %	44 %	67 %	30 %	63 %	27 %
Rupture	N ^{bre}	14	22	33	4	16	0	14
	%	56 %	40 %	46 %	33 %	59 %	0 %	54 %
Traverse	N ^{bre}	8	5	5	0	0	4	0
	%	32 %	9 %	7 %	0 %	0 %	29 %	0 %
Arrêt avant défaillance	N ^{bre}	3	1	2	0	3	7	5
	%	12 %	2 %	3 %	0 %	11 %	29 %	19 %

La Figure 57 montre les forces horizontales mesurées pour les différents types de fixations, sur les solives de 9,5 et 12 po, dans le cas de la configuration 1T. Certains types de fixations offrent des résistances plus élevées, notamment VB21, T11, CL31 - E, CL22 - AF et CL33 - AF. La Figure 58 présente les forces horizontales mesurées pour les différents types de fixations, sur les solives de 14 et 16 po, dans le cas de la configuration 1T. Le constat de la Figure 57 se répète pour les solives de plus grandes dimensions, à l'exception de la fixation CL31 - E pour les solives de 16 po (aussi observé à la Figure 56).

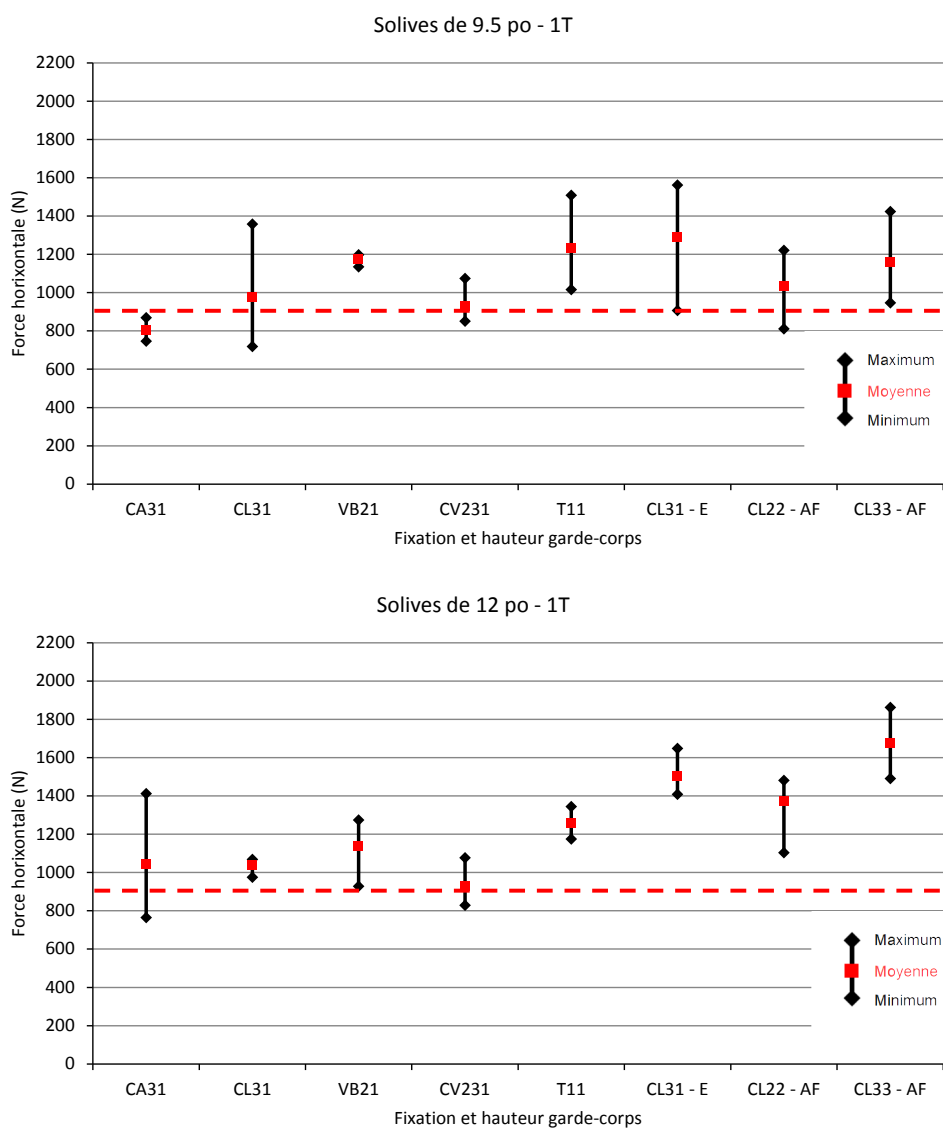


Figure 57. Force horizontale maximale en fonction du type de fixation, pour la configuration 1T, solives de 9,5 et 12 po.

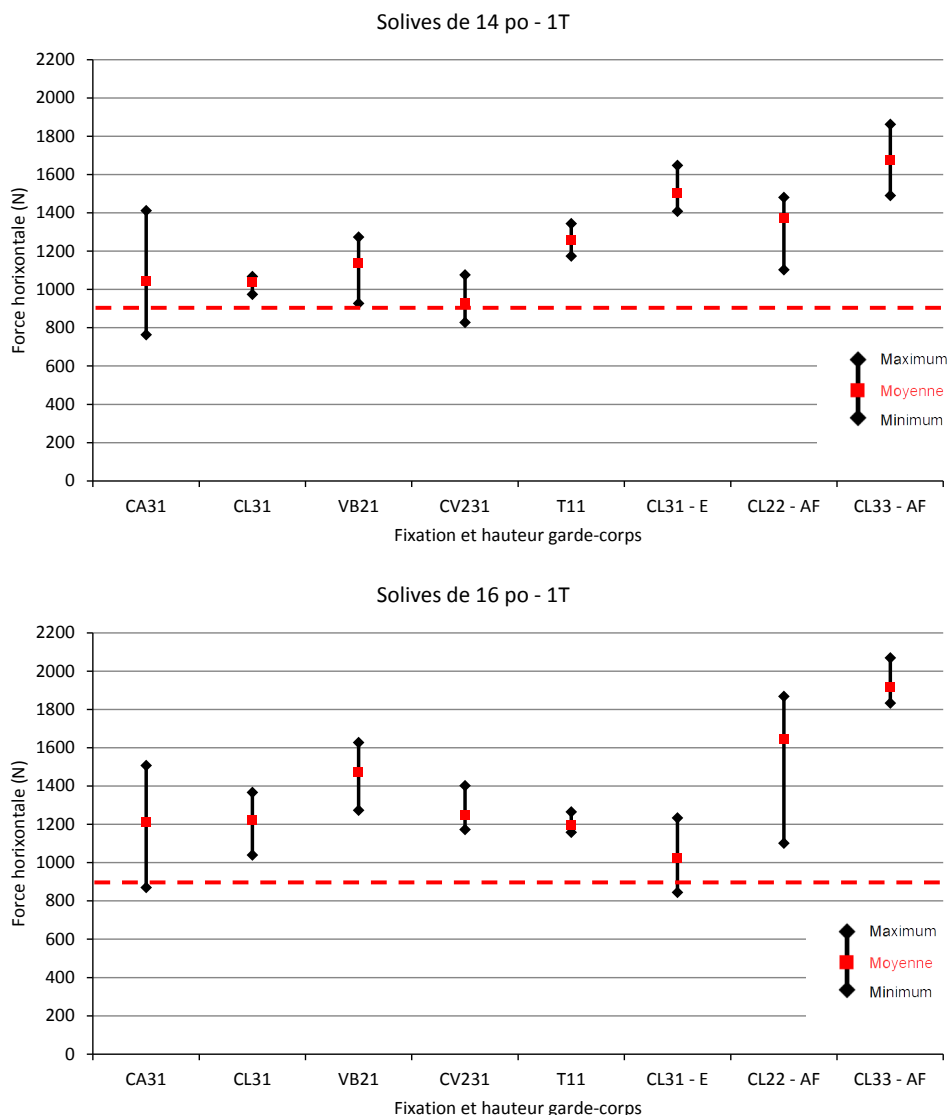


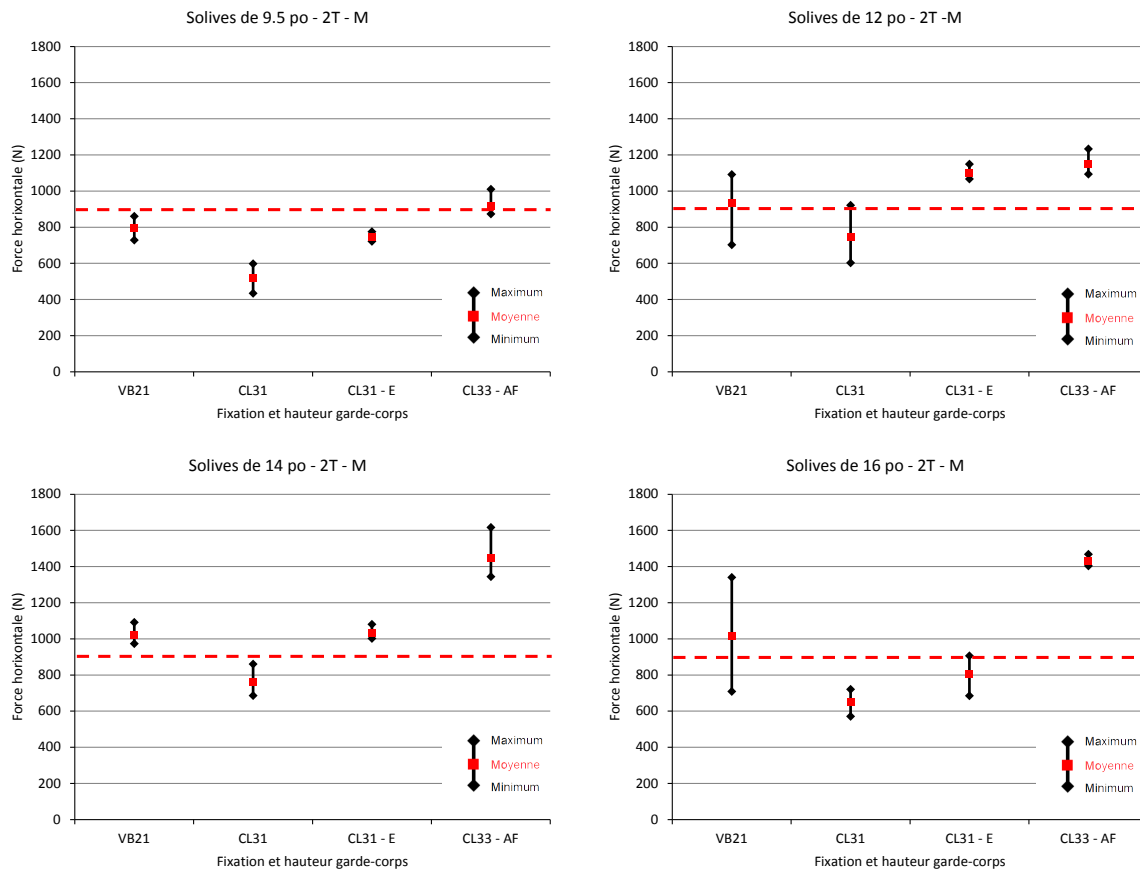
Figure 58. Force horizontale maximale en fonction du type de fixation, pour la configuration 1T, solives de 14 et 16 po.

Le Tableau 18 présente le taux d'échec (défaillance avec une force horizontale inférieure à 900 N) pour chaque type de fixation, sur la configuration 2T-M. Le type de fixation CL31 présente un taux d'échec proche de 100 %. Les performances des fixations CL31 - E et VB21 ne sont pas idéales, et seul le type de fixation CL33 - AF donne des performances intéressantes. Quelques essais ont été réalisés avec la fixation CL22 - AF, mais la plastification des clous en cisaillement et un taux d'échec de 100 % lors des premiers essais nous ont conduit à rajouter deux clous (un en haut et un en bas), afin d'atteindre un niveau de performance satisfaisant.

Tableau 18. Taux d'échec en fonction du type de fixation, pour la configuration 2T-M

Type de fixation	VB21	CL31	CL31 - E	CL33 - AF
Taux d'échec	42 %	92 %	46 %	17 %

La Figure 59 montre effectivement que la fixation de type CL33 - AF donne les meilleurs résultats en termes de résistance. La fixation VB21 donne des résultats satisfaisants sur les solives de 14 et 16 po, alors que la fixation CL31 - E donne des résultats satisfaisants sur les solives de 12 et 14 po (on observe une diminution de la résistance pour les solives de 16 po, comme dans le cas de la configuration 1T).

**Figure 59. Force horizontale maximale en fonction du type de fixation, pour la configuration 2T-M.**

Le Tableau 19 présente les forces horizontales minimales, maximales et moyennes obtenues pour chaque configuration d'essai et chaque hauteur de fixation, dans le cas de la configuration 1T. Ce tableau et la Figure 60 présentent également les écarts-types et la moyenne moins deux écarts-types. Le Tableau 20 présente le même type de résultats que le Tableau 19, mais dans le cas de la configuration 2T-M. Dans ces tableaux, le coefficient de variation (COV) est calculé en prenant l'écart-type divisé par la moyenne. En supposant que la répartition des résultats d'essais correspond à une distribution normale, le calcul de la moyenne moins deux écarts-types donne une certitude à 95 % que le résultat d'essai sera supérieur à la force calculée. Ainsi, le Tableau 20 et la Figure 61 permettent d'identifier les types de fixation sécuritaires et

ceux qui ne le sont pas. Il apparaît que le type de fixation donnant les meilleurs résultats est CL33 - AF. Suivent CL31 - Équerre et VB21, pour certaines hauteurs de solives seulement. Pour la configuration 1T, un plus grand nombre de types de fixation permet d'atteindre les valeurs minimales exigées par le CSTC (Figure 60).

Tableau 19. Synthèse des résultats par type de fixation et par hauteur de solive pour la configuration 1T

Hauteur de fixation	Force horizontale	1T							
		CA31	CL31	VB21	CV231	VT11	CL31 - E	CL22 - AF	CL33 - AF
9.5 po	Min (N)	747,0	719,2	1134,4	851,6	1015,9	906,5	811,3	947,3
	Max (N)	869,1	1356,8	1198,0	1074,0	1508,0	1561,5	1221,1	1423,3
	Moyenne (N)	803,1	978,3	1176,5	930,7	1231,5	1288,7	1033,4	1161,8
	Écart-type σ (N)	54,8	236,1	29,7	101,5	205,5	278,4	169,0	197,2
	COV	6,8 %	24,1 %	2,5 %	10,9 %	16,7 %	21,6 %	16,4 %	17,0 %
	Moy-2 σ (N)	693,6	506,1	1117,0	727,7	820,6	732,0	695,3	767,5
12 po	Min (N)	764,4	973,7	927,0	827,7	1173,5	1407,6	1101,8	1489,9
	Max (N)	1411,1	1067,8	1272,7	1075,3	1343,3	1648,0	1480,4	1862,5
	Moyenne (N)	1046,2	1035,6	1138,8	927,7	1258,9	1504,0	1374,2	1676,6
	Écart-type σ (N)	232,4	43,8	142,1	106,5	69,3	103,8	157,6	152,1
	COV	22,2 %	4,2 %	12,5 %	11,5 %	5,5 %	6,9 %	11,5 %	9,1 %
	Moy-2 σ (N)	581,4	948,0	854,5	714,6	1120,2	1296,4	1059,0	1372,3
14 po	Min (N)	826,2	993,5	1383,2	658,4	1075,7	1129,1	861,6	1341,2
	Max (N)	1260,8	1100,2	1476,7	1282,7	1522,6	1605,7	1758,8	1935,5
	Moyenne (N)	971,9	1054,2	1428,7	1061,4	1212,6	1365,4	1379,6	1630,4
	Écart-type σ (N)	170,7	44,8	38,2	285,4	182,2	194,6	324,7	242,9
	COV	17,6 %	4,2 %	2,7 %	26,9 %	15,0 %	14,3 %	23,5 %	14,9 %
	Moy-2 σ (N)	630,4	964,7	1352,3	490,5	848,2	976,3	730,1	1144,6
16 po	Min (N)	869,3	1038,5	1273,4	1171,8	1157,4	844,9	1101,0	1832,9
	Max (N)	1507,1	1366,1	1627,1	1401,0	1264,1	1233,4	1867,9	2069,3
	Moyenne (N)	1214,1	1223,7	1471,5	1249,3	1193,8	1021,9	1643,6	1915,5
	Écart-type σ (N)	276,4	137,1	147,5	107,3	49,7	139,3	314,4	108,9
	COV	22,8 %	11,2 %	10,0 %	8,6 %	4,2 %	13,6 %	19,1 %	5,7 %
	Moy-2 σ (N)	661,4	949,5	1176,5	1034,7	1094,4	743,4	1014,8	1697,7

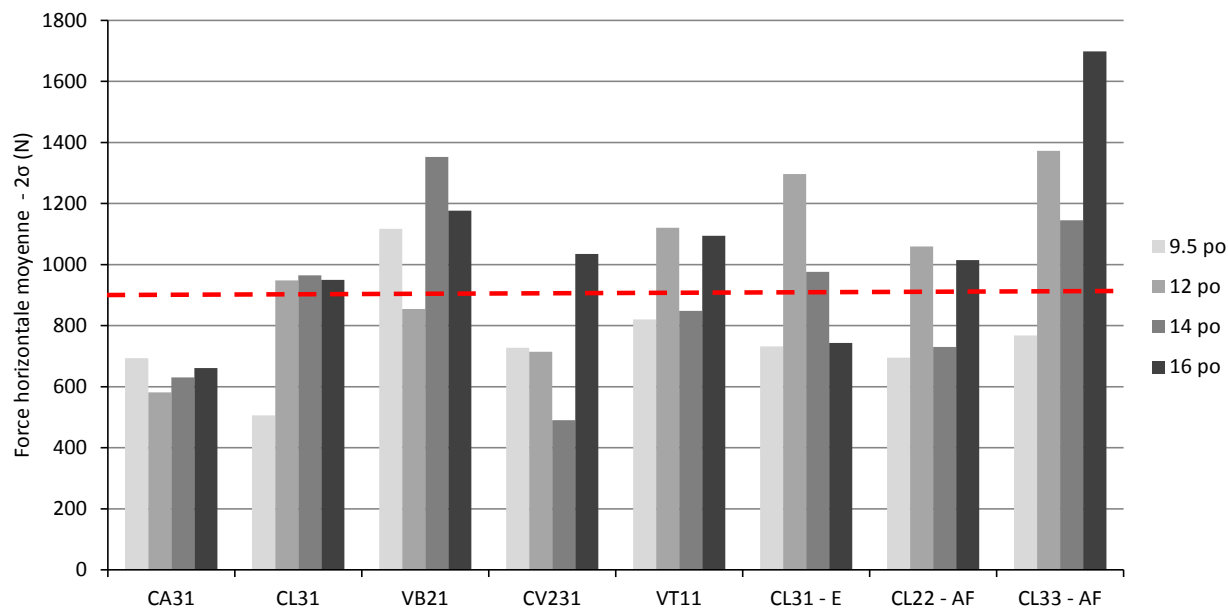


Figure 60. Force horizontale moyenne moins deux écart-type, en fonction du type de fixation, pour la configuration 1T.

Tableau 20. Synthèse des résultats par type de fixation et par hauteur de solive pour la configuration 2T-M

Hauteur de fixation	Force horizontale	2T-M			
		VB21	CL31	CL31 - E	CL33 - AF
9.5 po	Min (N)	727,9	434,7	721,6	872,6
	Max (N)	860,2	597,1	774,9	1010,3
	Moyenne (N)	795,7	518,7	747,4	919,5
	Écart-type σ (N)	54,1	66,4	21,8	64,2
	COV	6,8 %	12,8 %	2,9 %	7,0 %
	Moy-2 σ (N)	687,5	385,9	703,8	791,0
12 po	Min (N)	701,5	602,7	1066,6	1093,8
	Max (N)	1091,8	921,2	1148,4	1233,6
	Moyenne (N)	936,2	745,5	1101,5	1148,6
	Écart-type σ (N)	168,9	132,1	34,5	61,0
	COV	18,0 %	17,7 %	3,1 %	5,3 %
	Moy-2 σ (N)	598,5	481,3	1032,5	1026,7
14 po	Min (N)	972,9	686,0	1001,8	1343,9
	Max (N)	1091,1	859,6	1079,7	1616,7
	Moyenne (N)	1023,2	759,1	1033,3	1448,0
	Écart-type σ (N)	49,8	73,4	33,5	120,4
	COV	4,9 %	9,7 %	3,2 %	8,3 %
	Moy-2 σ (N)	923,6	612,2	966,4	1207,2
16 po	Min (N)	708,8	571,3	684,9	1402,9
	Max (N)	1339,9	720,9	906,2	1468,3
	Moyenne (N)	1015,9	650,3	803,0	1432,1
	Écart-type σ (N)	257,9	61,3	86,2	27,2
	COV	25,4 %	9,4 %	10,7 %	1,9 %
	Moy-2 σ (N)	500,0	527,6	630,6	1377,8

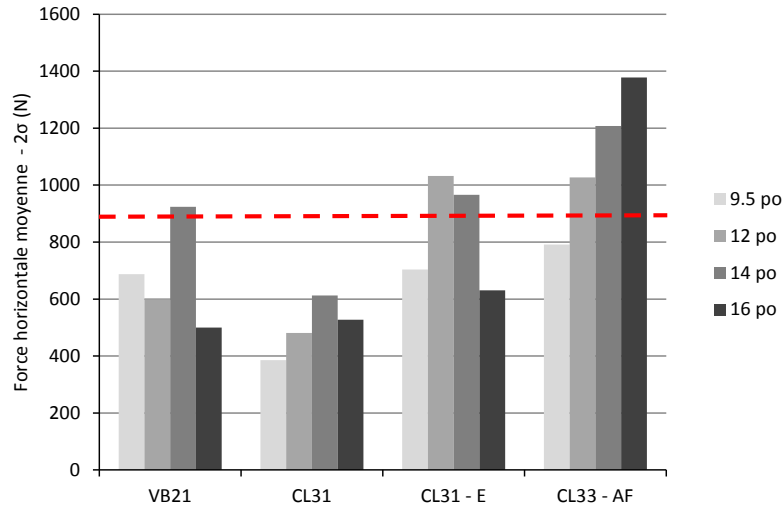


Figure 61. Force horizontale moyenne moins deux écarts-types, en fonction du type de fixation, pour la configuration 2T-M.

5.2 Garde-corps en bois fixés sur un mur préfabriqué

Au total, 98 essais de résistance ont été réalisés pour les garde-corps installés sur un mur préfabriqué reconstitué au laboratoire : 34 pour une hauteur de fixation de 12 po, 28 pour une hauteur de fixation de 16 po, et 36 pour une hauteur de fixation de 24 po. Selon la matrice d'essais, avec deux répliques pour chaque configuration et type de fixation, il devrait y avoir 33 essais pour les hauteurs de fixation 12 et 24 po (11 configurations-fixation x 3 essais) et 27 essais pour la hauteur de fixation 16 po (9 configurations-fixation x 3 essais). Le nombre d'essais pour chaque hauteur de fixation est plus élevé, car certains essais ont été repris, notamment dans le cas où un défaut de fixation a été identifié : fendillement du 1 po x 3 po, clou planté dans un nœud, etc. Les résultats détaillés pour chaque essai sont présentés en annexe B.

5.2.1 Exemple de résultats d'essais

Cette section présente les résultats des essais 23 à 25 effectués en date du 25 juillet 2018. Ces essais sont réalisés sur un garde-corps de 1,2 m dans la configuration 2T-M. Le garde-corps soumis à l'expérience est assemblé à la structure d'accueil (mur préfabriqué) à l'aide d'une fixation CL31 - E. Trois clous sont alignés verticalement et sont espacés d'environ 1 pouce centre à centre de manière à atteindre le 2 po x 4 po vertical dans le mur préfabriqué. L'autre clou est planté dans le montant 16 pouces plus bas que le clou le plus haut de la série des clous. Une équerre métallique de dimensions 3 po x 3 po est fixée entre le montant du garde-corps et le mur préfabriqué, à l'aide de 2 vis à bois #8 dans le montant (qui travailleront en arrachement) et 1 vis à bois #8 dans la lisse supérieure du mur préfabriqué (qui travaillera en cisaillement). Pour ces essais, l'application de la force oblique est dirigée directement sur le montant central du garde-corps.

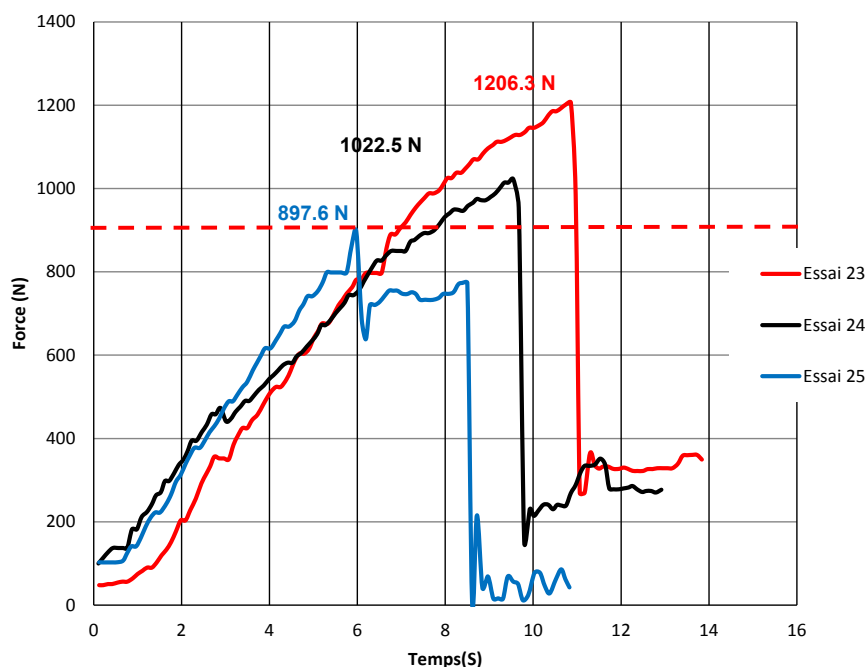


Figure 62. Résultats des essais 23 à 25.

La présence des deux sommets sur la courbe de l'essai 25 est due au fait que l'arrachement du montant du garde-corps analysé lors de cet essai s'est effectué en deux temps (Figure 62). Il y a eu un premier arrachement des trois clous de haut et une baisse de tension dans la sangle qui permet d'appliquer la force oblique, puis une plastification de l'équerre métallique suivie d'un deuxième arrachement. La moyenne des forces obliques maximales obtenues aux trois essais est de 1042,1 N. Les angles d'application de ces forces sur les garde-corps, mesurés par rapport à l'horizontale, varient entre $13,5^\circ$ et $14,1^\circ$. Ces angles ont permis de calculer les forces horizontales et verticales de chacun des trois essais. Il faut noter qu'une force supplémentaire de 251 N est ajoutée à chacune des forces verticales calculées avec la force oblique et l'angle correspondant. La moyenne des forces horizontales est calculée à 1011,9N avec un écart-type de 149,9 N. Cette moyenne dépasse le minimum exigé par le CSTC, soit 900 N pour une force horizontale. La moyenne des forces verticale est de 500,3 N avec un écart-type de 40,8 N. Elle est également supérieure au minimum exigé par le CSTC, soit 450 N pour une force verticale.

Les tableaux de synthèse des résultats d'essais sur le mur préfabriqué sont présentés en annexe B.

5.2.2 Fond de clouage

Cette section présente les longueurs de clous ou vis qui pénètrent effectivement dans les 2 po x 4 po verticaux du mur préfabriqué lors de l'installation des montants d'un garde-corps. En effet, l'installation des montants d'un garde-corps se fait vis-à-vis des 2 po x 4 po verticaux de la structure du mur préfabriqué. L'objectif visé est donc de fixer les montants sur des éléments plus résistants comme le bois plutôt que sur un OSB. Toutefois, avant d'atteindre le 2 po x 4 po intérieur, le clou ou la vis doivent traverser une profondeur de 2,44 po (arrondi à 2,5 po) composée respectivement de la profondeur du montant (1,5 po), de la profondeur de la fourrure

verticale en 1 po x 3 po (0,5 po) et de la profondeur de l'OSB (7/16 po) comme présenté sur la Figure 63.



Figure 63. Profondeur de pénétration pour un clou / une vis de 3,5 po.

La profondeur effective de pénétration dans le 2 po x 4 po du mur préfabriqué dépend du type de fixation utilisé. Elle varie entre 0,5 po et 1,0 po pour les types de fixation (clou ou vis) utilisés dans le cadre de ce projet. Le Tableau 21 présente les différents fonds de clouage (ou vissage) pour chaque type de fixation étudié.

Tableau 21. Fond de clouage / vissage dans le mur préfabriqué

Clou / vis	Calibre (gauge)	Longueur tige (po)	Fond de clouage / vissage (po)
Annelé	11	3,25	0,75
Lisse	11	3,25	0,75
Vis bois	10	3,50	1,00
Tirefond	3/8 po	3,00	0,50

5.2.3 Analyse statistique

L'analyse statistique a été réalisée à l'aide d'un logiciel de planification expérimentale (JMP). L'analyse statistique a d'abord été faite en considérant toutes les interactions de degré 2. Les interactions non statistiquement significatives ($P > 0,05$) ont été écartées de l'analyse. Il apparaît qu'aucune interaction n'est significative. Le facteur Hauteur de fixation n'est pas significatif non plus ($P > 0,45$). L'analyse de variance (ANOVA) est présentée au Tableau 22 et le test des effets au Tableau 23.

Tableau 22. ANOVA pour les essais sur le mur préfabriqué

Source	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	7	7236181	1033740	24,27
Erreur	90	3832739	42586	Prob. > F
Total corrigé	97	11068920		<,0001*

Tableau 23. Test des effets pour les essais sur le mur préfabriqué

Source	Nombre de coefficients	Degrés de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
Hauteur fixation	1	1	24478,2	0,57	0,45
Configuration	2	2	5604784,3	65,81	<,0001*
Fixation	4	4	2249814,3	13,21	<,0001*

Afin de vérifier si des biais expérimentaux sont intervenus dans la réalisation des essais, une analyse des résidus a été effectuée. La Figure 64 présente la distribution des résidus en fonction de la force horizontale mesurée et du numéro d'essai. La Figure 65 montre la vérification des quantiles normaux des résidus. Il apparaît que les résidus répondent à une distribution normale, ce qui nous permet de penser raisonnablement qu'il n'y a pas eu de biais non considéré dans la réalisation des essais, par exemple la vitesse d'application de la charge horizontale, ou l'humidité et la température du laboratoire. Par ailleurs, bien que la randomisation des essais ait été partielle (plusieurs essais successifs sur la même configuration et la même hauteur de fixation), ceci n'a pas induit de biais dans nos résultats.

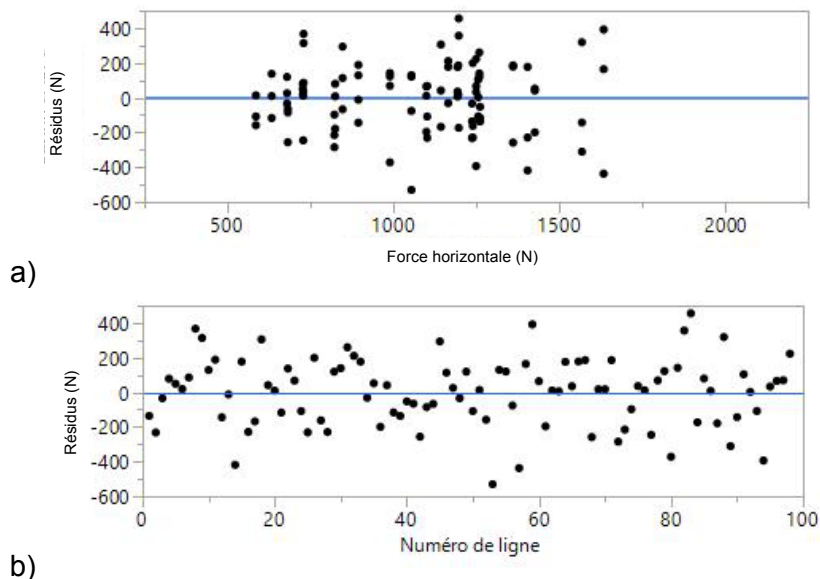


Figure 64. Distribution des résidus en fonction de la force horizontale prévue (a) et du numéro de ligne (numéro d'essai) (b).

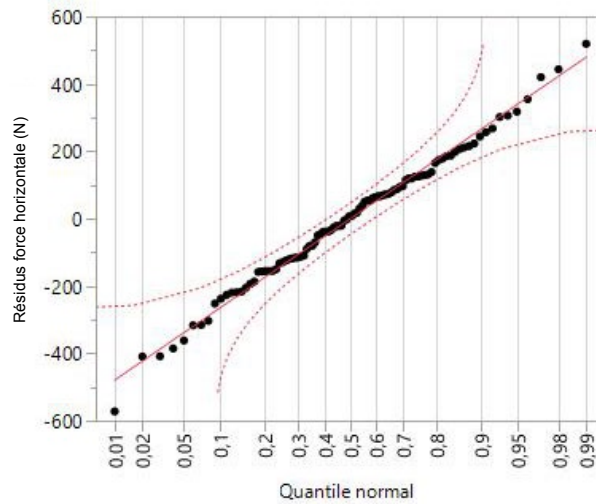


Figure 65. Vérification des quantiles normaux des résidus.

Le Tableau 24 présente l'ajustement du modèle. Le R^2 est peu élevé, et ceci est dû à la variabilité des essais avec des montants et un mur préfabriqué en bois.

Tableau 24. Ajustement du modèle

R carré	0,65
R carré ajusté	0,63
Racine de l'erreur quadratique moyenne	206,36
Moyenne de la réponse	1071,55
Observations (ou sommes pondérées)	98

5.2.4 Influence de la configuration du garde-corps

La Figure 66 présente une comparaison des forces horizontales maximales obtenues pour les configurations 1T, 2T-M et 3T-C, pour des hauteurs de fixation de 12 et 24 po. On peut remarquer que la résistance obtenue pour la configuration 2T-M est nettement plus faible que pour 1T et 3T-C. Dans le cas de la configuration 3T-C, la résistance obtenue est du même ordre de grandeur que pour une seule travée.

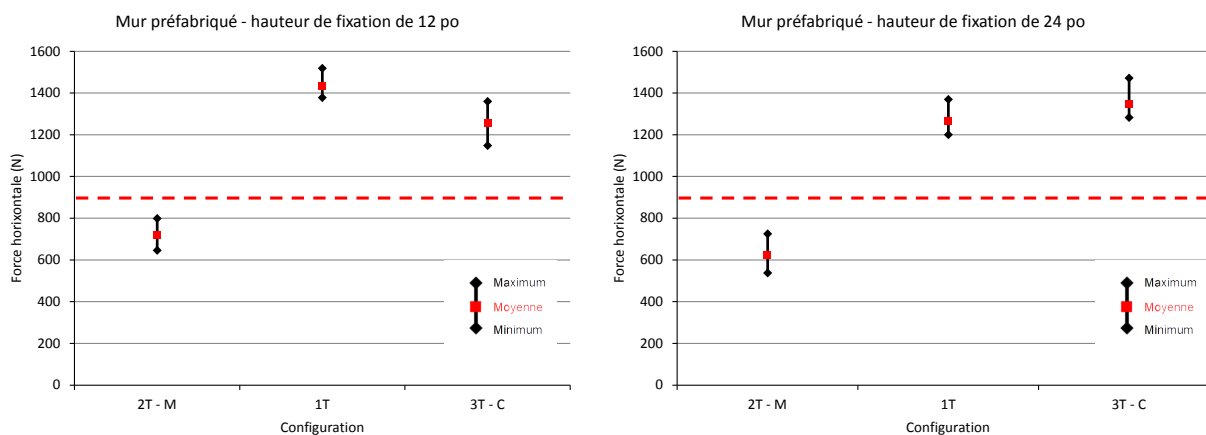


Figure 66. Force horizontale maximale pour trois configurations d’essai et des hauteurs de fixation de 12 et 24 po.

La Figure 67 présente une comparaison des forces maximales obtenues pour les configurations 1T et 2T-M, pour différents types de fixation et une seule hauteur de fixation. On peut remarquer que, comme observée sur la Figure 66 pour la fixation CL31, la force maximale obtenue est nettement plus faible dans le cas de la configuration 2T-M.

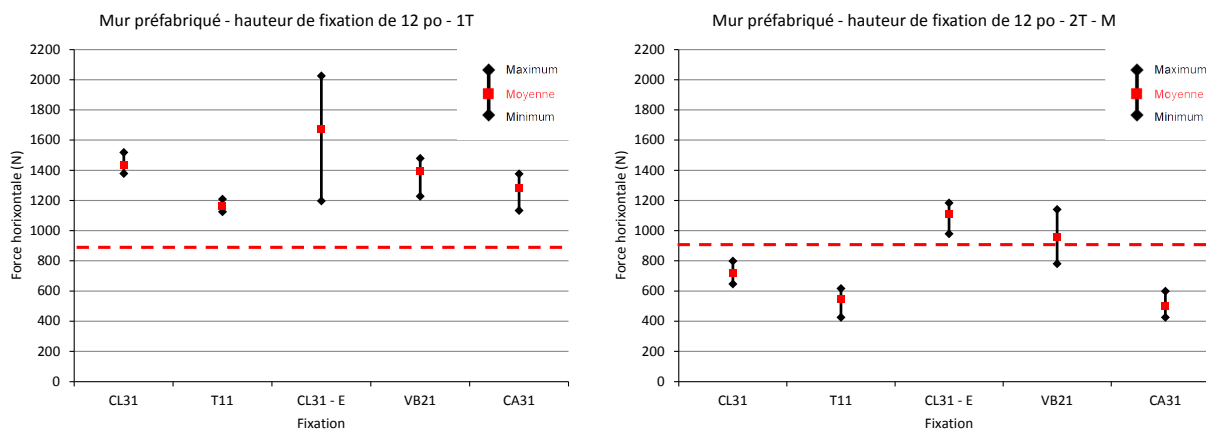


Figure 67. Force horizontale maximale pour deux configurations d’essai, 5 modes de fixation et une hauteur de fixation de 12 po.

De manière générale, la résistance minimale prescrite par le CSTC a été atteinte pour tous les essais portant sur les configurations 1T (42 essais) et 3T-C (7 essais). Pour la configuration 2T-

M, la résistance minimale prescrite par le CSTC n'a pas été atteinte dans 28 des 46 essais réalisés avec cette configuration. On observe que seulement 6 essais (sur 42) donnent une résistance pour la configuration 1T inférieure à celle mesurée pour la configuration 2T-M. Dans quatre cas l'écart observé est de moins de 10 %. Les deux autres cas correspondent à des essais où une équerre a été utilisée. Le comportement plastique de l'acier explique en partie cet écart. Comme anticipé, en règle générale, la résistance obtenue pour la configuration 2T-M est inférieure à celle pour 1T qui est elle-même inférieure à celle pour 3T-C (voir section 5.1.2 également).

Le Tableau 25 présente les statistiques de mode de défaillance en fonction de la configuration d'essai. On remarque une augmentation de la force moyenne mesurée lors de la défaillance par rupture, cependant, il ne semble pas y avoir de mode de défaillance préférentiel en termes de configuration, sauf pour le cas 3T-C. Dans le cas de la configuration 3T-C, le seul mode de défaillance observé est l'arrachement, mais les essais pour cette configuration ont été réalisés seulement avec la fixation CL 31, relativement sujette à une rupture par arrachement (voir Tableau 17).

Tableau 25. Mode de défaillance en fonction de la configuration d'essai

Mode de défaillance	Stats	2T-M (46 essais)	1T (42 essais)	3T-C (7 essais)
Arrachement	F moy (N)	763,3	1252,3	1308,4
	Nb	21	22	7
	%	46 %	52 %	100 %
Rupture	F moy (N)	909,1	1355,5	N/A
	Nb	25	19	0
	%	54 %	45 %	0 %

Dans le cas de la configuration 1T, le total n'atteint pas 100 %, car un essai n'a pas été mené jusqu'à la défaillance.

5.2.5 Influence de la hauteur de fixation

Les résultats présentés dans le Tableau 26 et la Figure 68 ne permettent pas de déceler de tendance nette concernant l'influence de la hauteur de fixation : ni sur la résistance des garde-corps ni sur le mode de défaillance. En effet, étant donné la faible profondeur du fond de clouage, la résistance à l'arrachement est relativement faible, et ne permet donc pas de déceler de différence notable même pour une hauteur de fixation plus grande.

Tableau 26. Mode de défaillance en fonction de la hauteur de fixation

Mode de défaillance	Hauteur de fixation		
	12 po	16 po	24 po
Arrachement	15	16	21
	54 %	48 %	58 %
Rupture	13	17	15
	46 %	52 %	42 %

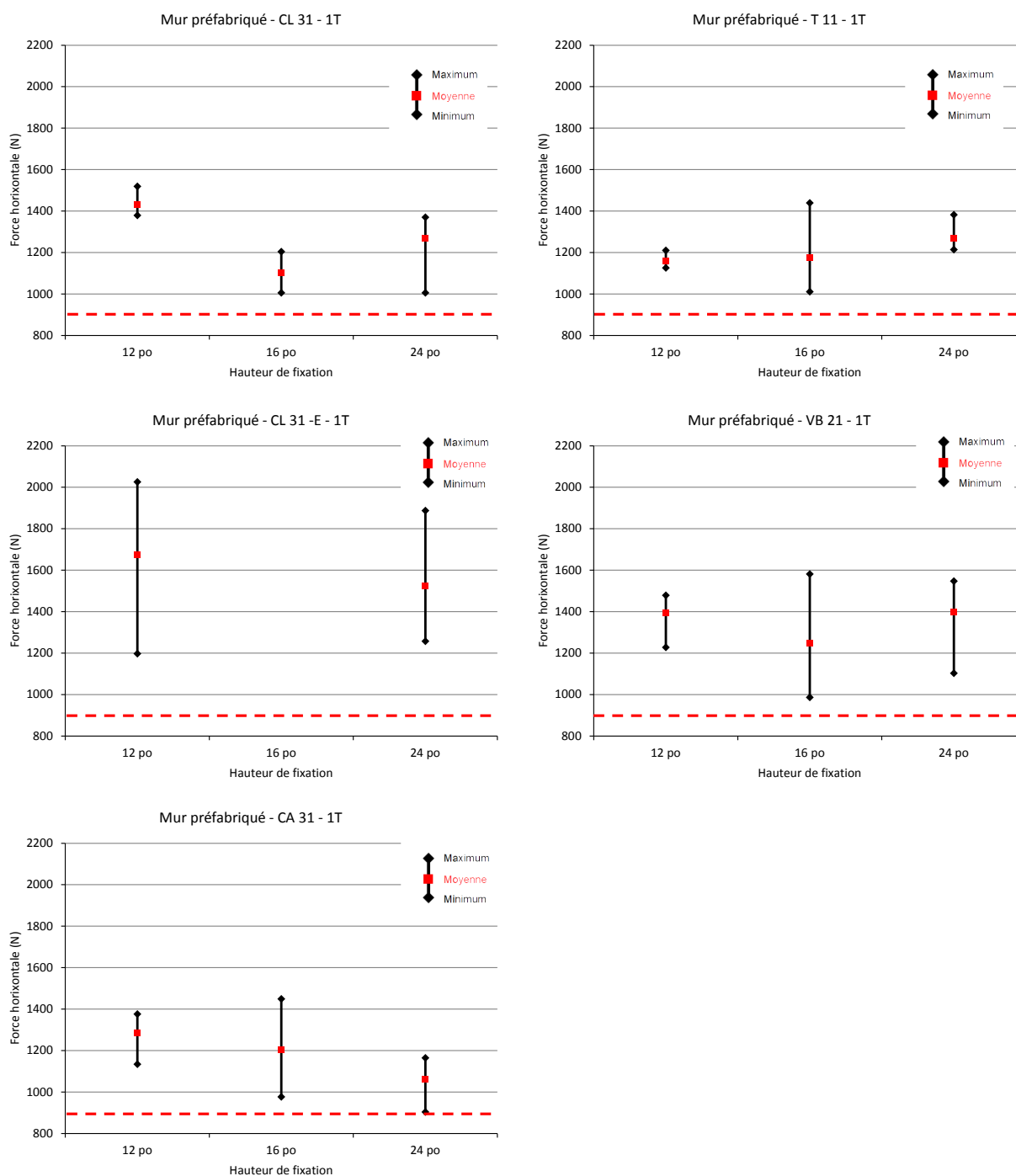


Figure 68. Force horizontale maximale en fonction de la hauteur de fixation.

5.2.6 Influence du type de fixation

La Figure 69 présente les forces horizontales maximales en fonction du type de fixation. On remarque que les fixations CL31 - E et VB21 sont les plus performantes. Ce constat est vrai pour une hauteur de fixation de 24 po ou de 16 po, mais aussi pour 12 po (Figure 67).

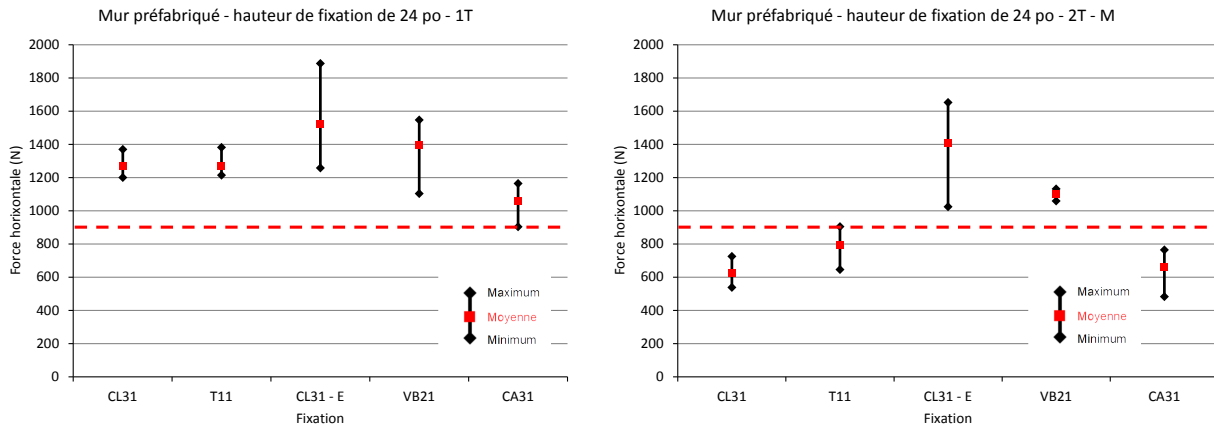


Figure 69. Force horizontale maximale en fonction du type de fixation et de la configuration d'essai, hauteur de fixation 24 po.

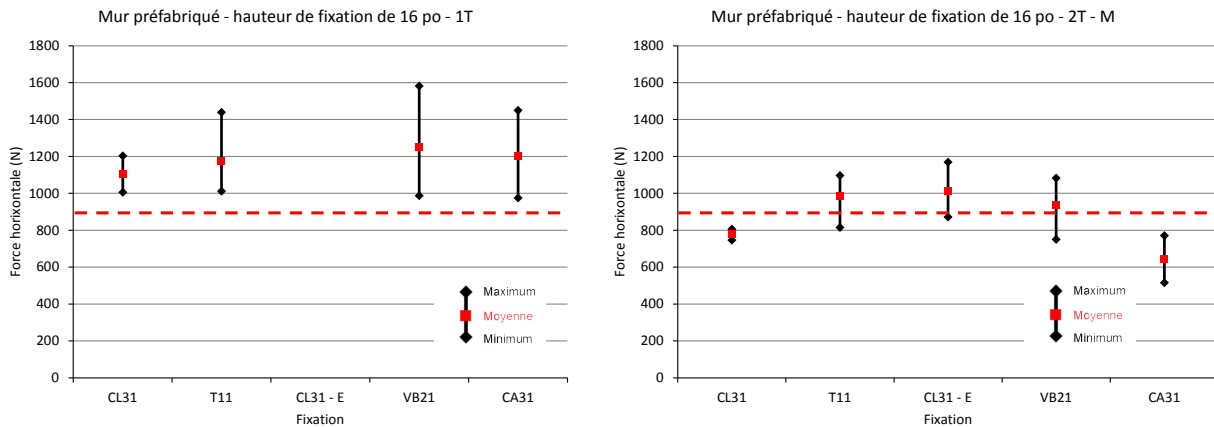


Figure 70. Force horizontale maximale en fonction du type de fixation et de la configuration d'essai, hauteur de fixation 16 po.

Les Figures 66 à 68 montrent que tous les types de fixation offrent une résistance correcte lorsque la force est appliquée sur une travée. Par contre, pour le cas critique (configuration 2T-M), les configurations CL31, T11 et CA31 n'offrent pas des résistances adéquates.

Le Tableau 27 répertorie les modes de défaillance en fonction du type de fixation. On remarque des disparités significatives en fonction du type de fixation. Les fixations de type CL31, CA31 et T11 présentent plus souvent une défaillance de type arrachement. Par contre, les fixations de type VB21 et CL31 - E ont plus fréquemment une rupture. Ce résultat est d'un intérêt particulier,

car il est transférable aux garde-corps avec montants métalliques : pour une fixation sur un mur préfabriqué, il serait préférable d’opter pour des vis à bois ou un renfort avec une équerre (soit l’équivalent de la « deuxième face » dans le cas des essais réalisés sur des structures réelles).

Tableau 27. Mode de défaillance en fonction du type de fixation

Mode de défaillance	Statistiques	Type de fixation				
		CL31	CA31	T11	VB21	CL31 - E
	Nb tot essais	26	18	18	20	16
Arrachement	Nb essais	18	17	11	3	3
	%	69 %	94 %	61 %	15 %	19 %
Rupture	Nb essais	8	1	7	17	12
	%	31 %	6 %	39 %	85 %	75 %

On notera que le total pour la fixation de type CL 31 - E n’est pas de 100 %, car un essai n’a pas été mené jusqu’à la défaillance.

Le Tableau 28 présente les forces horizontales minimales, maximales et moyennes obtenues pour chaque configuration d’essai et chaque hauteur de fixation, dans le cas de la configuration la plus critique, soit 2T-M. Ce tableau présente également les écarts-types et la moyenne moins deux écarts-types (Figure 71). Le Tableau 29 présente le même type de résultats que le Tableau 28, mais dans le cas de la configuration 1T (Figure 72). Les résultats du Tableau 29 ne permettent pas réellement de tirer de conclusion quant au type de fixation le plus sécuritaire.

En supposant que la répartition des résultats d’essais correspond à une distribution normale, le calcul de la moyenne moins deux écarts-types donne une certitude à 95 % que le résultat d’essai sera supérieur à la force calculée. Ainsi, le Tableau 28 et la Figure 71 permettent d’identifier les types de fixation sécuritaires et ceux qui ne le sont pas. Il apparaît que les deux types de fixation donnant des résultats acceptables sont CL31 - E et VB21.

Tableau 28. Synthèse des résultats par type de fixation pour la configuration d'essais critique (2T-M)

Hauteur de fixation	Force horizontale	2T-M				
		CL31	T11	CL31 - E	VB21	CA31
12 po	Min (N)	646,2	426,2	978,6	780,8	427,8
	Max (N)	799,1	617,1	1184,2	1140,9	599,5
	Moyenne (N)	716,9	546,8	1112,6	960,7	501,7
	Écart-type σ (N)	62,9	85,7	94,8	147,0	72,1
	COV	8,8 %	15,7 %	8,5 %	15,3 %	14,4 %
	Moy-2 σ (N)	591,0	375,4	922,9	666,7	357,6
16 po	Min (N)	746,5	815,5	871,6	751,1	516,6
	Max (N)	806,1	1096,7	1169,9	1083,3	770,9
	Moyenne (N)	776,5	985,3	1011,9	935,3	643,5
	Écart-type σ (N)	24,4	122,0	122,4	128,8	103,8
	COV	3,1 %	12,4 %	12,1 %	13,8 %	16,1 %
	Moy-2 σ (N)	727,7	741,3	767,0	677,8	435,9
24 po	Min (N)	537,9	646,2	1024,1	1058,8	483,6
	Max (N)	725,1	904,8	1653,0	1132,0	764,7
	Moyenne (N)	623,5	794,7	1410,3	1101,0	662,8
	Écart-type σ (N)	77,3	109,0	276,1	30,9	127,1
	COV	12,4 %	13,7 %	19,6 %	2,8 %	19,2 %
	Moy-2 σ (N)	469,0	576,7	858,1	1039,1	408,5

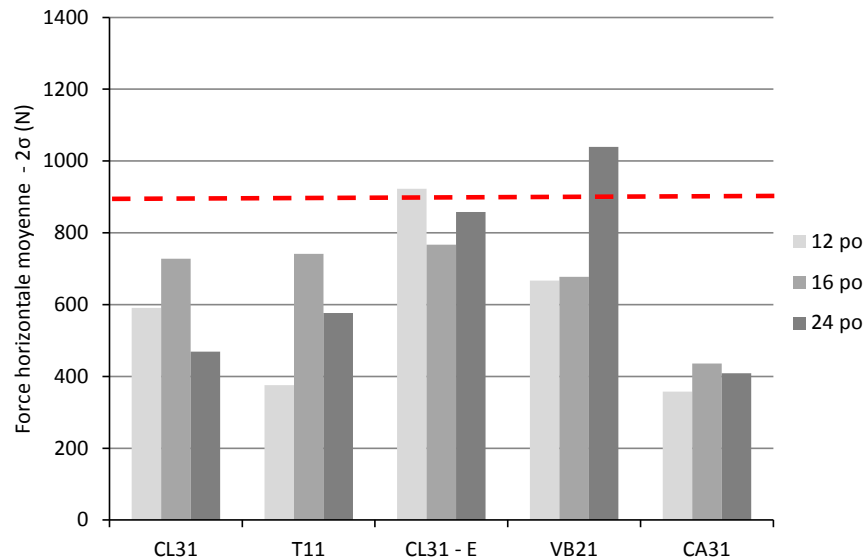
**Figure 71. Force horizontale moyenne moins deux écarts-types, en fonction du type de fixation, pour la configuration 2T-M.**

Tableau 29. Synthèse des résultats par type de fixation pour la configuration 1T

Hauteur de fixation	Force horizontale	1T				
		CL31	T11	CL31 - E	VB21	CA31
12 po	Min (N)	1378,4	1125,4	1197,1	1227,9	1134,1
	Max (N)	1519,1	1209,5	2026,3	1479,4	1376,1
	Moyenne (N)	1432,1	1160,1	1673,9	1391,7	1284,2
	Écart-type σ (N)	62,1	35,8	349,8	115,9	107,0
	COV	4,3 %	3,1 %	20,9 %	8,3 %	8,3 %
	Moy-2 σ (N)	1308,0	1088,4	974,4	1159,8	1070,2
16 po	Min (N)	1005,7	1011,0	-	986,5	976,2
	Max (N)	1203,6	1439,2	-	1582,2	1449,2
	Moyenne (N)	1103,6	1176,0	-	1248,4	1203,5
	Écart-type σ (N)	80,8	188,1	-	248,5	193,5
	COV	7,3 %	16,0 %	-	19,9 %	16,1 %
	Moy-2 σ (N)	942,0	799,9	-	751,5	816,4
24 po	Min (N)	1200,4	1213,9	1257,8	1103,0	904,0
	Max (N)	1369,5	1381,8	1887,5	1547,3	1164,1
	Moyenne (N)	1266,3	1270,0	1523,8	1396,5	1059,6
	Écart-type σ (N)	73,9	79,1	266,2	207,6	112,1
	COV	5,8 %	6,2 %	17,5 %	14,9 %	10,6 %
	Moy-2 σ (N)	1118,5	1111,8	991,3	981,4	835,3

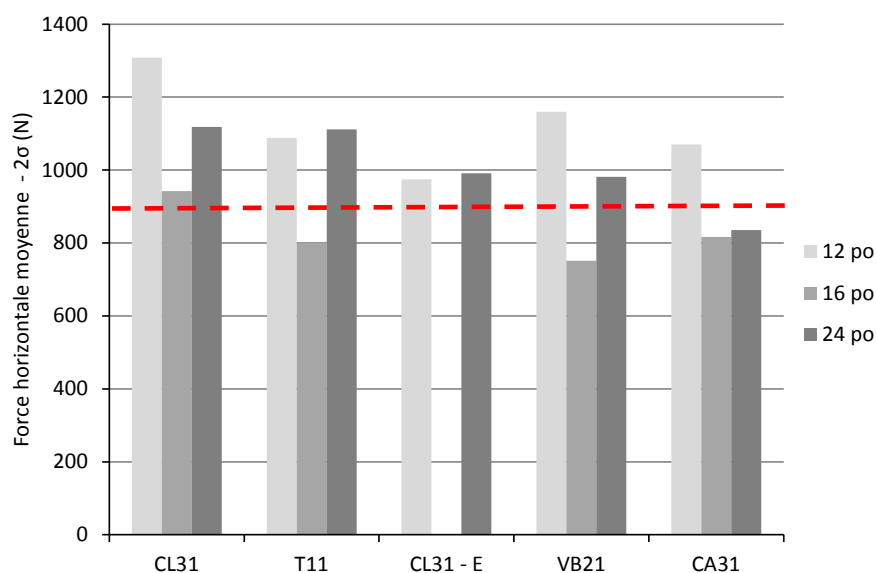


Figure 72. Force horizontale moyenne moins deux écart-type, en fonction du type de fixation, pour la configuration 1T.

6. RÉSULTATS DES ESSAIS SUR LES GARDE-CORPS MÉTALLIQUES ET DISCUSSION

6.1 Résultats d'essais

Le Tableau 30 illustre les résultats des essais réalisés sur les parapets 1, 2 et 3, soit ceux de la bâtisse datant de 2013. Le Tableau 31 présente les résultats des essais réalisés sur le parapet 4 sur la bâtisse de 2008.

Au total, 38 essais ont été réalisés sur les bâtisses de 2008 et 2013. Ces essais sont numérotés de 1 à 39, car l'essai numéro 7 n'a pas été réalisé à la suite à une erreur de numérotation sur le terrain. Sur les 38 essais réalisés, 36 d'entre eux portent sur les garde-corps, et les deux autres sur la résistance à l'arrachement d'un ancrage ponctuel (essais 22 et 23). Pour chaque essai, l'angle d'inclinaison de la force appliquée sur la lisse supérieure ou le montant du garde-corps est indiqué, ainsi que la force oblique directement mesurée par la cellule de charge. Les composantes horizontales et verticales de cette force inclinée apparaissent dans les deux dernières colonnes des tableaux.

Tableau 30. Résultats des essais réalisés avec les garde-corps métalliques sur le bâtiment de 2013

N° d'essai	Garde-Corps			Parapet	Mode De Fixation						Résultat				
	Types	N ^{bre} Travée	T. Chargée		Type	N ^{bre} Vis	Répartition Vis		Base Montant	2 ^e e Support	Mode De Défaillance	Angle (Degré)	Force Oblique (N)	Force Vrt (N)	Force Hz (N)
							Base Montant	2e Support							
1	1	3	Centrale	1	Autotaraudeuse	6	6		Horizontale		Arrachement	18,4	719,7	226,9	683,0
2	1	1	Centrale	2	Autotaraudeuse	4	4	-	Façade	S-P		12,9	1040,3	231,8	1014,1
3	1	1	Montant	2	Autotaraudeuse	4	4	-	Façade	S-P		12,9	1071,9	238,8	1045,0
4	1	3	Centrale	2	Autotaraudeuse	6	6		Horizontale		Arrachement	12,4	560,5	120,6	547,4
5	3	1	Centrale	2	Autotaraudeuse	7	4	3	Horizontale	Plaque		11,3	1074,9	210,8	1054,0
6	3	1	Montant	2	Autotaraudeuse	7	4	3	Horizontale	Plaque		11,3	1011,0	198,3	991,4
8	2	1	Centrale	1	Tirefonds	8	6	2	Horizontale	L		18,5	1169,5	372,0	1108,8
9	2	1	Montant	1	Tirefonds	8	6	2	Horizontale	L	Déformation	18,5	695,7	221,3	659,6
10	2	1	Montant	1	Tirefonds	8	6	2	Horizontale	L	Déformation	18,5	757,9	241,1	718,6
11	1	3	Centrale	1	Tirefonds	6	6		Horizontale		Déformation	18,2	1103,4	344,9	1048,1
12	3	1	Centrale	3	Tirefonds	7	4	3	Façade	Plaque		21,4	1345,3	490,7	1252,6
13	3	1	Montant	3	Tirefonds	7	4	3	Façade	Plaque		21,4	1309,5	477,7	1219,3
14	3	1	Centrale	3	Tirefonds	4	4	-	Façade	S-P	Glissement Sp	21,4	1090,6	397,8	1015,5
15	3	1	Centrale	3	Tirefonds	6	4	2	Façade	S-P		21,4	1709,2	623,4	1591,4
16	3	1	Montant	3	Tirefonds	6	4	2	Façade	S-P		20,4	1633,2	568,3	1531,2
17	2	1	Centrale	3	Tirefonds	7	6	1	Horizontale	L		21,1	1589,0	570,8	1483,0
18	2	1	Montant	3	Tirefonds	7	6	1	Horizontale	L		21,1	1947,5	699,5	1817,5

Tableau 31. Résultats des essais réalisés avec les garde-corps métalliques sur le bâtiment de 2008

N° d'essai	Garde-Corps			Parapet	Mode de Fixation						Résultat				
	Types	N ^{bre} Travées	T. Chargée		Type	N ^{bre} Vis	Répartition Vis		Base Montant	2 ^e Support	Mode de Défaillance	Angle (Degré)	Force Oblique (N)	Force Vrt (N)	Force Hz (N)
							Base Montant	2 ^e Support							
19	1	1	Centrale	4	Tirefonds	5	4	1	Façade	S-P		16,6	1756,9	500,7	1684,1
20	1	1	Montant	4	Tirefonds	5	4	1	Façade	S-P		16,6	1400,4	399,1	1342,3
21	2	1	Centrale	4	Noire	4	4		Horizontale		Arrachement	14,4	446,4	111,0	432,3
22	Ancrage			4	Tirefonds	10	10						2873,0		2873,0
23	Ancrage			4	Noire	10	10						2901,0		2901,0
24	2	1	Centrale	4	Tirefonds	4	4		Horizontale		Arrachement	14,4	154,3	38,4	149,5
25	2	1	Centrale	4	Noire	6	6		Façade		Arrachement	14,4	1545,1	384,3	1496,6
26	2	1	Montant	4	Noire	6	6		Façade		Arrachement	14,4	695,9	173,1	674,0
27	2	1	Centrale	4	Noire	9	6	3	Façade	Plaque		14,3	2006,5	494,1	1944,7
28	2	1	Montant	4	Noire	9	6	3	Façade	Plaque		14,3	1576,9	388,3	1528,3
29	2	1	Centrale	4	Autotaraudeuse	6	6		Façade		Arrachement	14,3	1388,3	341,8	1345,6
30	2	1	Montant	4	Autotaraudeuse	6	6		Façade		Arrachement	14,3	545,5	134,3	528,7
31	2	1	Montant	4	Autotaraudeuse	6	6		Façade		Arrachement	14,3	667,3	164,3	646,7
32	2	1	Centrale	4	Noire	4	4		Façade		Arrachement	14,3	949,4	233,8	920,2
33	2	1	Centrale	4	Tirefonds	6	6		Façade		Arrachement	14,3	1277,8	314,6	1238,5
34	2	1	Centrale	4	Tirefonds	9	6	3	Façade	Plaque		14,3	1807,3	445,0	1751,7
35	2	1	Montant	4	Tirefonds	9	6	3	Façade	Plaque		14,3	2024,6	498,5	1962,3
36	3	1	Centrale	4	Tirefonds	5	4	1	Façade	Plaque	Arrachement	14,8	1313,6	336,3	1269,8
37	2	2	Montant	4	Tirefonds	6	6		Façade		Arrachement	14,8	888,2	227,4	858,6
38	2	2	Montant	4	Tirefonds	6	6		Façade		Arrachement	14,8	927,4	237,5	896,5
39	2	2	Montant	4	Noire	6	6		Façade		Arrachement	14,8	624,7	160,0	603,9

6.2 Influence de l'âge de la bâtisse, de l'état et du type de parapet

Que ce soit sur la bâtisse construite en 2013 ou celle construite en 2008, les parapets étaient tous sains et présentaient un taux d'humidité bas (10 % ou moins). Il est donc impossible de tirer des conclusions à l'égard de l'influence de l'âge de la bâtisse sur la résistance des garde-corps ou celle de l'état des parapets.

Il est raisonnable d'estimer que des parapets en mauvais état (bois pourri) ou présentant un fort taux d'humidité auront une résistance plus faible que des parapets de construction similaire en bon état. Cependant, il est impossible de prédire, *a priori*, si les exigences de résistance du CSTC seront atteintes ou non.

Les essais réalisés sur les bâtisses ont néanmoins permis de comparer le comportement de différents types de garde-corps et de fixations pour différents types de parapets. Un des enseignements majeurs de ces essais sur le terrain est qu'il n'existe pas de garde-corps universel. En effet, en fonction du type et de la taille du parapet, certains garde-corps et méthodes de fixation vont présenter une résistance accrue comparativement à d'autres, qui seront plus appropriés pour d'autres parapets.

6.2.1 Parapet 1

En raison des petites dimensions du parapet 1, les garde-corps 3 ne pouvaient être utilisés.

Les garde-corps 1 pouvaient servir seulement en utilisant la plaque horizontale pour la fixation, ce qui donnait de faibles résistances ou de très grandes déformations même pour trois travées consécutives (essai N.1 avec vis autotaraudeuses et N.11 avec tirefonds).

Seul le garde-corps 2 avec la pièce en « L » a pu être installé correctement sur le parapet 1 et a donné des résistances adéquates sur une travée (essai N.8).

Il est à noter que lorsque la force est appliquée directement sur le montant, la résistance prescrite par le CSTC n'est pas atteinte, mais que la valeur est relativement élevée ce qui pourrait apporter un certain degré de sécurité dans un cas d'utilisation réelle.

6.2.2 Parapet 2

Pour le parapet 2, la fixation avec serre-parapet a donné de bons résultats pour les garde-corps 1 (essai N.2 sur une travée et essai N.3 sur le montant), par contre, pour les mêmes garde-corps, la seule fixation des montants par la plaque horizontale montre que la résistance maximale est très inférieure aux exigences du CSTC (essai N.4).

Le garde-corps 3 n'a pas pu être utilisé avec le serre-parapet sur le parapet 2 à cause de sa trop faible largeur. Par contre, les résultats obtenus avec le garde-corps 3 et une plaque stabilisatrice montrent que la résistance minimale prescrite par le CSTC est atteinte pour une travée (essai N.5) ou directement sur un montant (essai N.6).

Le garde-corps 2 n'a pas été testé sur le parapet 2, car la forme de la ferblanterie ne permettait pas une fixation adéquate pour appliquer une force vers l'intérieur du bâtiment. En revanche, dans un cas d'utilisation réel, son installation aurait certainement été faisable et les résistances

anticipées supérieures aux exigences du CSTC (en se basant sur les résultats obtenus sur le parapet 4).

6.2.3 Parapet 3

Pour le parapet 3, qui présente les plus grandes dimensions, tous les garde-corps étaient facilement installables.

Le garde-corps 1 n'a pas été testé sur ce parapet, car il présentait déjà une résistance adéquate sur le parapet 2 (avec serre-parapet) et que son comportement sous charge avec le serre-parapet était similaire à celui du garde-corps 3 avec serre-parapet qui, lui, a été testé.

La résistance atteinte avec le garde-corps 3 et une plaque stabilisatrice a été très supérieure aux exigences du CSTC pour une travée (essai N.12) et directement sur le montant (essai N.13). Les résistances sont également très supérieures aux exigences du CSTC lorsque le garde-corps 3 est utilisé en conjonction avec un serre-parapet, sur une travée (essai N.15) et directement sur le montant (essai N.16).

Enfin, le garde-corps 2 avec la pièce en « L » donne également des résistances très supérieures aux exigences du CSTC pour une travée (essai N.17) et directement sur le montant (essai N.18). La résistance anticipée pour le même garde-corps utilisé avec des plaques stabilisatrices est supérieure aux exigences du CSTC, comme ce qui a été observé sur le parapet 4 ou pour le garde-corps 3 avec des plaques stabilisatrices sur le parapet 3.

Notons donc que, sur un parapet de grandes dimensions, tous les garde-corps sont facilement installables, avec parfois la possibilité d'utiliser plusieurs méthodes de fixations possibles, et que tous les essais ont été concluants, qu'il s'agisse d'essais sur la travée ou directement sur le montant. Cependant, aucun essai avec une seule plaque horizontale de fixation n'a été effectué pour ce parapet.

6.2.4 Parapet 4

Le parapet 4 est celui dont la largeur est la moins importante parmi les 4 parapets testés. D'autre part, ce parapet est essentiellement un panneau d'isolant, et ne présente pas de résistance structurale très élevée ni de fond de vissage à proprement parler. En ce sens, il constitue la borne inférieure des essais de résistance *in situ* réalisés lors de cette étude. Tous les essais concluants sur ce type de parapet devraient donner des résistances supérieures sur des parapets de plus grandes dimensions (à condition que les parapets soient sains).

Le garde-corps 1 avec serre-parapet a démontré des résistances très supérieures aux exigences du CSTC sur ce parapet, pour une travée (essai N.19) et directement sur le montant (essai N.20).

Le garde-corps 3 n'est pas adapté pour des parapets de si petites dimensions : les dimensions de la plaque stabilisatrice ne permettaient de positionner qu'une vis dans le parapet, et le serre-parapet n'était pas utilisable non plus. Le seul essai réalisé avec la plaque stabilisatrice (essai N.36) montre que la résistance atteinte est supérieure aux exigences du CSTC pour une travée, mais la résistance de chaque montant est estimée à environ la moitié de la résistance sur une travée, soit 625 N environ, ce qui est inférieur aux 900 N exigés pour la force

horizontale. Étant donné que la dimension du parapet ne permettait pas de fixer adéquatement la plaque stabilisatrice, les essais sur ce garde-corps n'ont pas été poussés plus loin.

Quinze essais ont été réalisés sur ce parapet avec les garde-corps 2. La faible dimension du parapet ne permettait pas d'utiliser adéquatement la pièce tubulaire en « L », mais par contre il était très facile d'utiliser la plaque stabilisatrice. Les essais avec plaque stabilisatrice ont tous permis d'atteindre la résistance exigée par le CSTC. Les essais réalisés en n'utilisant que le seul pied de fixation du montant, soit placé horizontalement, soit verticalement, n'ont permis d'atteindre la résistance prescrite par le CSTC qu'à quelques reprises, et uniquement pour des essais sur une travée. Les essais sur un montant ont montré une résistance inférieure aux exigences du CSTC. Il est à noter que la documentation du fabricant indique clairement que le pied de fixation doit être utilisé conjointement avec un « stabilisateur de poteau » : soit la pièce en « L » ou la plaque stabilisatrice. Les résultats d'essais montrent que cette exigence du manufacturier est nécessaire pour répondre aux critères de résistance du CSTC.

6.3 Influence du type de vis

L'influence du type de vis a été observée pour les parapets 1 et 4, et pour les garde-corps 1 et 2 respectivement.

6.3.1 Parapet 1

Le Tableau 32 présente les résistances maximales mesurées et les modes de défaillance observés pour les garde-corps 1, dans le cas d'une configuration 3T-C. Les garde-corps n'étaient fixés au parapet que par la plaque horizontale de leur pied de fixation. Notons que la résistance atteinte est plus élevée avec les tirefonds qu'avec les vis autotaraudeuses. Néanmoins, la déformation très importante observée dans le cas de la fixation à l'aide de tirefonds, pour une force légèrement supérieure aux 900 N imposés par le CSTC, qui plus est dans le cas d'une section de garde-corps constituée de trois travées consécutives, ne permet pas de conclure à un test réussi.

Tableau 32. Résistances et mode de défaillance observés pour trois travées du garde-corps 1

Essai	Fixation (par montant)	Résistance max mesurée	Mode de défaillance
N.1	6 vis autotaraudeuses	720 N	Arrachement des pieds de montant
N.11	6 tirefonds	1100 N	Début d'arrachement et déplacement horizontal trop important

6.3.2 Parapet 4

Le Tableau 33 expose les résistances maximales mesurées et modes de défaillance observés pour les garde-corps 2, installés sur le parapet 4, et chargés au centre d'une unique travée ou directement sur le montant. Deux modes de fixation des montants sont comparés : l'utilisation du pied de fixation uniquement (essais IM) et qui n'est pas recommandé par le manufacturier ; et l'utilisation du pied de fixation en conjonction avec une plaque stabilisatrice (essais 2 + PS).

Notons que dans le cas des essais IM, lorsque l'on tire directement sur le montant, la résistance maximale atteinte est de l'ordre de 50 % de la résistance atteinte sur une travée, ce qui constitue un résultat attendu. La résistance atteinte avec 4 vis noires est environ 61 % de celle

atteinte avec 6 vis noires, ce qui là encore semble logique. Contrairement aux anticipations, la résistance obtenue pour 6 vis noires est la plus élevée. En effet, comparativement aux vis autotaraudeuses qui présentent le même nombre de filets par pouce, les vis noires ont des filets qui sont un peu plus larges, ce qui permet probablement d’obtenir une résistance un peu plus importante à l’arrachement. Comparées aux tirefonds, les vis noires ont un nombre de filets plus élevé par pouce : 14 pour les vis noires contre 10 pour les tirefonds. Lorsque le fond de vissage est très réduit, ce qui est le cas pour le parapet 4 qui est essentiellement un panneau d’isolant, cette diminution du nombre de filets par pouce est probablement ce qui explique la baisse de résistance observée. Notons que les essais effectués en utilisant uniquement le pied de fixation pour installer les montants des garde-corps sur le parapet 4 ne sont pas concluants : la résistance atteinte est correcte lorsque l’on travaille au centre d’une travée, mais trop faible lorsque la force est appliquée directement sur le montant.

Tableau 33. Résistances et mode de défaillance observés sur le parapet 4

Garde-corps	Configuration	4 vis noires	6 vis noires	6 vis autotaraudeuses	6 tirefonds
2	1T	949 N	1545 N	1388 N	1277 N
2	1T-M*	-	696 N (45 %)	667 N (48 %)	-
2	2T-M	-	625 N	-	888 N 927 N
2 + PS	1T	-	> 2006 N	-	> 1807 N
2 + PS	1T-M*	-	> 1577 N	-	> 2025 N

*une seule travée, charge appliquée directement sur un montant

Les essais utilisant le pied de fixation en conjonction avec une plaque stabilisatrice ont tous montré des résistances largement supérieures aux exigences du CSTC, que la force soit appliquée sur une travée ou directement sur le montant. Dans aucun cas, les essais n’ont été menés jusqu’à l’arrachement des garde-corps, car les résistances atteintes étaient très élevées, d’une part, et que l’augmentation de la force devenait difficile avec un treuil manuel, d’autre part.

Le parapet 4 constituant une borne inférieure de résistance des garde-corps par ses faibles dimensions et sa constitution, il est raisonnable de s’attendre à ce que ce mode de fixation des garde-corps (pied de fixation et plaque stabilisatrice) permette d’atteindre la résistance minimale exigée par la réglementation sur tous les types de parapets.

6.4 Influence du type de fixation des montants

Le Tableau 34 résume les combinaisons de garde-corps et de fixation des montants aux parapets qui ont été étudiées.

Tableau 34. Combinaisons de garde-corps et fixation des montants

Garde-corps	1	2	3
Fixation 1 face	Plaque horizontale	Plaque horizontale ou verticale	-
Fixation 2 faces	Serre parapet	Tube en « L » Plaque stabilisatrice	Serre-parapet Plaque stabilisatrice

Sur les 36 essais de résistance de garde-corps qui ont été effectués, 15 d'entre eux utilisaient une fixation de montant avec une plaque vissée sur une seule face du parapet : soit sur le dessus du parapet, soit sur sa face verticale. Aucun de ces essais n'a permis d'atteindre la résistance prescrite par le CSTC dans le cas le plus défavorable (6 essais), soit la force appliquée directement sur le montant. De faibles résistances ont également été observées dans certains cas sur une travée et même sur trois travées consécutives : sur les 9 essais effectués sur une travée ou 3 travées, 6 ne permettent pas d'atteindre la résistance exigée par le CSTC.

Les 21 essais effectués en utilisant une fixation de montant faisant appel à deux faces du parapet, que ce soit pour le cas d'une plaque stabilisatrice ou d'un serre parapet ou d'une pièce stabilisatrice en « L » ont permis d'atteindre des résistances supérieures aux exigences du CSTC dans la majorité des cas. Seuls 2 essais (9,5 % des cas), ont donné des résistances inférieures aux exigences du CSTC, et ces deux cas correspondaient à des chargements appliqués directement sur le montant, soit le cas le plus défavorable. Notons cependant que, dans ces deux cas, il n'y a pas eu de rupture nette de la fixation du montant, mais un arrachement progressif, ce qui est moins dangereux.

6.5 Comportement sous charge

Contrairement aux observations effectuées lors des essais réalisés lors de l'étude [Système d'ancrage de garde-corps sur des toits plats pour les couvreurs](#) (Lan et Daigle, 2011), aucune plastification visible des montants n'a été détectée lors de la majorité des essais. Lors des essais en laboratoire (Lan et Daigle, 2011), la plastification a été observée à la base des montants lors des essais avec les garde-corps fixés sur des billes de bois, ce qui constitue un ancrage très rigide. Dans le cas de garde-corps installés sur des parapets, les montants n'ont travaillé que dans leur domaine élastique. Lors des essais réalisés sur le terrain, les montants des garde-corps ont présenté un comportement élastique dans tous les cas sauf un : lors de l'essai N.20 (garde-corps 1), avec une force appliquée directement sur le montant, jusqu'à une valeur de 1400 N oblique, soit une composante horizontale de 1340, ce qui est près de 50 % supérieur à l'exigence fixée par le CSTC. Par ailleurs, bien que le montant se soit plastifié à sa base, le point de rupture n'a pas été atteint.

7. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

7.1 Garde-corps en bois installés sur des solives ajourées

Un total de 262 essais de résistance ont été effectués sur les solives ajourées : 58 sur les solives de 9,5 po, 83 sur les solives de 12 po, 62 sur les solives de 14 po et 59 sur les solives de 16 po. Les résultats de certains essais ont été écartés, notamment lorsque des défauts de mise en place de la fixation des montants des garde-corps étaient observés : fendillement du 2 po x 3 po, clou non planté dans le 2 po x 3 po ou dépassant en dessous, clou planté dans un nœud, etc. L'intérêt de faire des essais sur un nombre important de configurations et de types de fixation, tout en gardant un nombre de répétition limité était d'identifier les grande tendances en terme de résistance des garde-corps. Des études subséquentes portant sur un nombre de configurations et de fixation plus limité mais avec un nombre de répétitions plus élevé pourraient être intéressantes.

Comme anticipé, la configuration d'essai la plus défavorable est la configuration comportant deux travées et pour laquelle la force est appliquée directement sur le montant (2T-M). Les configurations à trois travées, avec la charge appliquée sur la travée centrale (3T-C) et celle avec la charge appliquée sur la travée de rive (3T-R) donnent les résistances les plus importantes, et représentent un système de garde-corps continu. La configuration à une travée (1T) est un intermédiaire entre 2T-M et 3T. Si la résistance prescrite par le CSTC est atteinte sur la configuration 2T-M, il est certain que le système de garde-corps complet l'atteindra également.

Comme anticipé, la hauteur du garde-corps au-dessus de la surface de travail influence la résistance : plus le garde-corps est haut, plus la résistance sera faible. Cette observation concorde avec la théorie classique de la résistance des matériaux : le moment fléchissant à la base du montant est directement lié à la hauteur du garde-corps (bras de levier).

En général, les résultats d'essais montrent que les résistances atteintes sur les solives de plus grandes dimensions sont supérieures à celles atteintes pour des solives de plus petites dimensions. En particulier, le taux d'échec est très élevé pour les solives de plus petite dimension (9,5 po) : 78,8 %, contre 25-30 % environ pour les autres dimensions de solives.

Enfin, le type de fixation influence très nettement les résistances obtenues lors des essais. Certains types de fixation sont à éviter, notamment celles à base de clous vrillés (CV231, 6 clous en tout) et de clous annelés (CA31, 4 clous en tout), avec des taux d'échec de près de 50 %. Notons qu'avec la fixation utilisant des vis à bois (VB21, 3 vis en tout), le mode de défaillance « arrachement » n'a jamais été observé : c'est la rupture du montant qui survient en premier. L'ajout d'une équerre (CL31 - E) à la fixation à base de clous lisses (CL31, 3 clous en tout) permet de réduire le pourcentage de défaillance par arrachement au profit d'une rupture du montant. L'ajout de l'équerre permet également d'augmenter significativement la résistance du garde-corps. Les quatre types de fixation offrant les meilleures performances sont : VB21, T11 (tirefonds), CL31 - E et CL33 – AF (clou lisse, 6 clous en tout, montant travaillant sur son axe fort).

Cette étude présente certaines limites : le nombre de répliques pour chaque configuration-fixation était relativement bas (2 répliques) afin de pouvoir étudier une variété importante de

fixations et de configurations d'essais. Malgré ce nombre de répliques limité, l'étude a clairement mis en évidence des tendances ou confirmé des comportements sous charges qui étaient anticipés. Afin d'étudier plus finement les différences entre les types de fixation les plus performants, il serait souhaitable d'entreprendre une autre étude avec un nombre de répliques plus élevé, et se concentrant notamment sur la configuration 2T-M. Également, des essais de résistance *in situ* seraient particulièrement intéressants à effectuer, quoique probablement compliqués à mettre en œuvre.

Les résultats d'essais permettent de formuler les recommandations suivantes :

- privilégier un essai directement sur le montant si l'on souhaite vérifier la résistance d'un système de garde-corps en bois *in situ*;
- privilégier des garde-corps de 1 m de hauteur plutôt que 1,2 m lorsque c'est possible, car cela permet de réduire les efforts au niveau de la fixation des montants;
- privilégier une orientation des montants suivant l'axe fort lorsque c'est possible (aux extrémités des balcons notamment);
- choisir un des systèmes de fixation qui ont démontré de bonnes performances lors de cette activité de recherche : VB21, T11, CL31 - E, CL33 - AF.

7.2 Garde-corps en bois installés sur des murs préfabriqués

Au total, 98 essais de résistance ont été réalisés pour les garde-corps installés sur un mur préfabriqué reconstitué au laboratoire : 34 pour une hauteur de fixation de 12 po, 28 pour une hauteur de fixation de 16 po, et 36 pour une hauteur de fixation de 24 po. Les résultats de certains essais ont été supprimés, notamment lorsqu'un défaut de fixation était identifié : fendillement du 1 po x 3 po, clou non planté dans le 2 po x 4 po, clou planté dans un nœud, etc.

Comme pour les essais sur les solives, la configuration la plus critique est 2T-M. Si la résistance prescrite par le CSTC est atteinte sur la configuration 2T-M, il est certain que le système de garde-corps complet l'atteindra également. Les résultats d'essais n'ont pas permis de mettre en évidence une influence claire de la hauteur de fixation. Des études plus approfondies devraient être faites afin de vérifier l'influence de ce paramètre sur les résistances mesurées.

Cette étude présente certaines limites : le nombre de répliques pour chaque configuration-fixation était relativement bas (2 répliques) afin de pouvoir étudier une variété importante de fixations et configurations d'essais. Malgré ce nombre de répliques limité, l'étude a clairement mis en évidence des tendances ou confirmé des comportements sous charges qui étaient anticipés. Afin d'étudier plus finement les différences entre les types de fixation les plus performants, il serait souhaitable d'entreprendre une autre étude avec un nombre de répliques plus élevé, et se concentrant notamment sur la configuration 2T-M. Également, des essais de résistance *in situ* seraient particulièrement intéressants, quoique probablement compliqués à mettre en œuvre.

Les résultats d'essais permettent de formuler les recommandations suivantes :

- privilégier un essai directement sur le montant si l'on souhaite vérifier la résistance d'un système de garde-corps en bois *in situ*;
- privilégier des garde-corps de 1 m de hauteur plutôt que 1,2 m lorsque c'est possible, car cela permet de réduire la pression subie par la fixation des montants;
- choisir des vis ou clous ayant une longueur permettant d'atteindre un fond de clouage le plus profond possible;
- choisir un des systèmes de fixation qui a démontré de bonnes performances lors de cette activité de recherche : VB21, CL31 - E.

7.3 Garde-corps métalliques installés sur des parapets

Ce rapport a présenté les 36 essais de résistance qui ont été réalisés les 5 et 6 juillet 2018 sur des bâtiments existants. Ces essais ont étudié les variables suivantes :

- trois garde-corps de fabricants différents;
- trois types de stabilisateurs de montant différents : serre-parapet, plaque stabilisatrice, et tube en « L » (voir les combinaisons garde-corps / fixation au Tableau 34);
- deux types de vis et un type de tirefond;
- quatre parapets de dimensions différentes : trois sur le bâtiment de 2013 et un sur le bâtiment de 2008;
- chargement sur le montant, sur une travée ou sur trois travées consécutives (chargement sur la travée centrale).

Avant les essais, des inspections des parapets ont été effectuées par une firme d'ingénierie. Les parapets des deux bâtiments étaient tous en bon état et présentaient une hygrométrie faible, comprise entre 7 et 10 %. Les parapets sont de type sandwich, c'est-à-dire de construction symétrique, mais présentent des fabrications différentes. Le parapet 4 est essentiellement un panneau d'isolant dépassant au-dessus de la surface du toit. Les dimensions de trois des parapets sont relativement petites : de l'ordre de 15 cm d'épaisseur, tandis qu'un autre est de grandes dimensions (de l'ordre de 30 cm d'épaisseur).

Les garde-corps ne sont pas tous utilisables aisément sur tous les types de parapets. Notons, en particulier, que le garde-corps 3 n'est pas prévu pour être installé sur des parapets de petites dimensions. Idéalement, pour un même système de garde-corps, il est pratique d'avoir plusieurs options de fixation pour les montants. Les résultats montrent qu'il est aisé d'installer les garde-corps sur les parapets de grandes dimensions et que de grandes résistances à l'arrachement sont obtenues.

Les résultats d'essais montrent une influence du type de vis, mais la différence entre la vis noire, la vis autotaraudeuse et le tirefond n'est pas si grande compte tenu de la variabilité des résistances à l'arrachement observée en laboratoire. Lorsque le nombre de vis utilisé pour la fixation du pied du montant est inférieur à la recommandation du fabricant, la résistance à l'arrachement est proportionnellement plus faible.

Les résultats indiquent clairement que la méthode de fixation des montants n'exploitant qu'une seule face du parapet a conduit à plusieurs échecs : la résistance maximale obtenue lors de

l'arrachement du montant du garde-corps était inférieure aux exigences du CSTC lorsque la force était appliquée directement sur le montant. À l'inverse, les résultats d'essais montrent que lorsque le montant des garde-corps est fixé sur deux faces du parapet (deux faces verticales ou une face verticale et une face horizontale), la résistance à l'arrachement est supérieure aux exigences du CSTC dans la majorité des cas. Les seuls échecs observés sont survenus sur un parapet de petites dimensions et, dans le cas d'essais de chargement sur le montant directement, soit le cas le plus critique. Notons cependant que ces essais n'ont pas mené à une rupture fragile, mais plutôt à un comportement ductile. De plus, les résistances obtenues sont très élevées lorsque deux faces du parapet sont mobilisées, même sur le parapet 4, qui ne comporte pourtant pas de structure en bois assurant un fond de vissage significatif.

Cette étude présente certaines limites, du fait de la complexité inhérente à la réalisation d'essais sur des structures réelles : disponibilité des bâtisses et de la main-d'œuvre spécialisée, contraintes de temps et de météo, souci de ne pas trop endommager les structures de nos partenaires, coûts de réalisation des essais et de réparation des parapets à la suite des essais, travail en hauteur. Ainsi, le nombre de parapets et le nombre de bâtisses d'essais sont limités, mais les résultats montrent que les résistances obtenues sont dans certains cas inférieures au minimum exigé par le CSTC. Il serait souhaitable que d'autres études se penchent sur la résistance *in situ* de différents systèmes de garde-corps.

Les résultats d'essais permettent de formuler les recommandations suivantes :

- installer le nombre de vis ou tirefonds recommandé par le fabricant;
- utiliser un système de fixation des montants faisant appel à deux faces du parapet;
- dans la mesure du possible, choisir des systèmes de garde-corps modulaires avec plusieurs options pour fixer les montants à la structure d'accueil : serre-parapet, plaque stabilisatrice, tube en « L »;
- préférentiellement, choisir des systèmes de garde-corps qui s'adaptent aux parapets de petites dimensions.

7.4 Recommandations pour de futures études

Cette activité de recherche a permis de mettre en évidence que certains types de fixations de garde-corps en bois offrent une résistance supérieure à d'autres, soit pour une installation des montants sur des solives ajourées ou sur des murs préfabriqués. Néanmoins, la méthodologie utilisée dans cette étude pourrait être utilisée à nouveau afin d'élargir les conclusions, notamment en étudiant :

- L'effet d'autres types de clous ou de vis que l'on peut rencontrer sur les chantiers;
- L'effet d'autres types de systèmes de renforcement à la base des montants en bois : goussets en contreplaqué, équerres métalliques de plus grandes dimensions, pied métallique dans lequel viendrait s'enficher le montant en bois, etc.
- La résistance de montants en bois installés sur des escaliers;
- L'effet de l'humidité sur la résistance de systèmes de garde-corps en bois (lorsque le garde-corps est exposé à la pluie par exemple).

De même, si les essais réalisés avec les garde-corps métalliques sur des toitures réelles ont permis de mettre en évidence certaines tendances, la méthodologie utilisée dans cette étude mériterait d'être étendue à un plus grand nombre de bâtisses, d'âges différents et présentant

des parapets en moins bon état que ceux sur lesquels ont été menés les essais lors de la présente étude.

BIBLIOGRAPHIE

- Branchtein, M. C. (2013). *Lifeline design : Calculation of the tensions*. Communication présentée à International Society for Fall Protection Symposium, Las Vegas.
- CAN/CSA-S16. (2013). *Règles de calcul des charpentes en acier*. Association canadienne de normalisation.
- Code national du Bâtiment du Canada (2015).
- CNESST. (2011). *Un garde-corps conforme, c'est quoi ?* YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=pCWPPhNBnKI>.
- CNESST. (2018). *Statistiques annuelles 2017*.
- CSTC. (2018). Code de sécurité pour les travaux de construction - S-2.1, r.4: Éditeur officiel du Québec.
- Duguay, P., Boucher, A., Prud'homme, P., Busque, M.-A., et Lebeau, M. (2017). *Lésions professionnelles indemnisées au Québec en 2010-2012. Profil statistique par industrie – catégorie professionnelle* (Rapport n° R-963). Montréal, QC, Canada: IRSST.
- Erdil, Y. Z., Zhang, J., et Eckelman, C. A. (2002). Holding strength of screws in plywood and oriented *Forest Products Journal*, 52(6), 8.
- Galy, B., et Lan, A. (2016). Fixation des garde-corps sur une structure existante. *Travail et Santé*, 32(1).
- Lan, A., et Daigle, R. (2011). *Système d'ancrage de garde-corps sur des toits plats pour les couvreurs* (Rapport n° R-678). Montréal, QC, Canada; IRSST.
- MOL, M. o. L. o. O. (2015). Alert: Temporary Aluminum Guard Rail Post Assembly.
- Rammer, D. R. (2010). Fastenings. Dans *Wood Handbook – Wood as an Engineering Material*: United States Department of Agriculture – Forest Service – Forest Products Laboratory.
- Sabourin, G. (2011 2011). Faire tomber les risques de chutes de hauteur. *Prévention au travail, Printemps*.
- SAS Institute Inc. (2018). JMP 14.10. Cary, NC: SAS.
- Semple, K. E., et Smith, G. D. (2006). Prediction of internal bond strength in particleboard from screw withdrawal resistance models. *Wood and Fiber Science*, 38(2), 256-267.

ANNEXE A : RÉSULTATS D'ESSAIS DE LABORATOIRE POUR LES SOLIVES

Cette annexe présente les résultats d'essais réalisés sur les solives. Le Tableau 35 expose les résultats d'essais pour les solives de 9,5 po, le Tableau 36 pour les solives de 12 po, le Tableau 37 pour les solives de 14 po et le Tableau 38 pour les solives de 16 po.

Tableau 35. Résultats des essais réalisés sur les solives de 9,5 po

N° essai	Hauteur garde-corps (m)	Configuration	Fixation	Mode de défaillance	Force Hz max (N)
52	1,2	1T	CL31	Arrachement	518,91
52-bis	1,2	1T	CL31	Arrachement	719,24
53	1,2	1T	CL31	Arrachement	1356,8
54	1,2	1T	CL31	Arrachement	866,5
55	1	1T	CL31	Rupture	970,69
56	1	1T	CL31	Rupture	842,87
57	1	1T	CL31	Arrachement	871,96
58	1	1T	CL31	Arrachement	1277,5
59	1	1T	CA31	Arrachement	914,12
60	1	1T	CA31	Arrachement	1201,1
61	1	1T	CA31	Arrachement	1270,6
62	1,2	1T	CA31	Arrachement	845,34
63	1,2	1T	CA31	Arrachement	747
64	1,2	1T	CA31	Arrachement	751,01
65	1,2	1T	CA31	Arrachement	869,08
67	1,2	1T	VB21	Traverse	1198
68	1,2	1T	VB21	Rupture	1134,4
69	1,2	1T	VB21	Traverse	1197
70	1,2	1T	CV231	Arrachement	851,55
71	1,2	1T	CV231	Arrachement	866,56
72	1,2	1T	CV231	Arrachement	1074
73	1,2	1T	T11	Arrachement	1170,60
74	1,2	1T	T11	Arrachement	1508,00
75	1,2	1T	T11	Arrachement	1015,51
76	1,2	1T	CL31 - E	Arrachement	906,50
77	1,2	1T	CL31 - E	Rupture	1398,10
78	1,2	1T	CL31 - E	Rupture	1661,50
79	1,2	1T	CL22 - AF	Arrachement	1221,1
80	1,2	1T	CL22 - AF	Arrachement	811,3
81	1,2	1T	CL22 - AF	Arrachement	1067,8
82	1,2	3T-C	CL31	Arrachement	871,25
83	1,2	3T-C	CL31	Rupture	1275,80

N° essai	Hauteur garde-corps (m)	Configuration	Fixation	Mode de défaillance	Force Hz max (N)
84	1,2	3T-C	CL31	Arrachement	1164,00
85	1,2	3T-C	CA31	Arrachement	834,26
86	1,2	3T-C	CA31	Arrachement	955,62
87	1,2	3T-C	CA31	Traverse	1038,4
182	1,2	3T-R	CL31	Arrachement	1038
183	1,2	3T-R	CL31	Arrachement	808,3
184	1,2	3T-R	CL31	Arrachement	808
185	1,2	3T-R	CA31	Arrachement	1064,2
186	1,2	3T-R	CA31	Arrachement	900,87
186-bis	1,2	3T-R	CA31	Arrachement	1175
187	1,2	3T-R	CA31	Arrachement	985,05
204	1,2	2T-M	CL31	Arrachement	597,05
205	1,2	2T-M	CL31	Arrachement	434,69
206	1,2	2T-M	CL31	Arrachement	524,3
207	1,2	2T-M	CL31 - E	Arrachement	774,89
208	1,2	2T-M	CL31 - E	Arrachement	721,55
209	1,2	2T-M	CL31 - E	Arrachement	745,78
210	1,2	2T-M	VB21	Traverse	727,87
211	1,2	2T-M	VB21	Traverse	860,21
212	1,2	2T-M	VB21	Traverse	798,93
213	1,2	2T-M	CL33 - AF	Arrachement	1010,3
214	1,2	2T-M	CL33 - AF	Arrachement	872,56
215	1,2	2T-M	CL33 - AF	Arrachement	875,54
242	1,2	1T	CL33 - AF	Rupture	947,27
243	1,2	1T	CL33 - AF	Rupture	1423,3
244	1,2	1T	CL33 - AF	Rupture	1114,9

Tableau 36. Résultats des essais réalisés sur les solives de 12 po

N° essai	Hauteur garde-corps (m)	Configuration	Fixation	Mode de défaillance	Force Hz max (N)
1	1,2	1T	CV33	Rupture	436
2	1,2	1T	CV33	Arrachement	423
3	1,2	1T	CV33	Arrachement	657
4	1,2	3T-C	CV33	Arrêt av déf	714,8
5	1,2	3T-C	CV33	Arrachement	1020
6	1,2	1T	VB22	Rupture	1020
7	1,2	1T	VB22	Traverse	1319
8	1,2	1T	VB22	Rupture	956
9	1,2	1T	VB21	Rupture	927
10	1,2	1T	VB21	Rupture	1091
11	1,2	1T	VB21	Traverse	1273
12	1,2	1T	VB21	Traverse	1264
13	1,2	1T	CA33	Rupture	1165
14	1,2	1T	CA33	Traverse	1334
15	1,2	1T	CA33	Arrachement	1194
16	1,2	1T	CA21	Arrachement	662
17	1,2	1T	CA21	Arrachement	895
18	1,2	1T	CA21	Traverse	951
19	1,2	1T	CA31	Rupture	1004
20	1,2	1T	CA31	Arrachement	1411
21	1,2	1T	CA31	Rupture	764
22	1,2	1T	CA31	Arrachement	1006
23	1,2	1T	CL31	Arrachement	456
23 bis	1,2	1T	CL31	Arrachement	876
24	1,2	1T	CL31	Rupture	1130
25	1,2	1T	CL31	Arrachement	1256
26	1,2	1T	CL31	Arrachement	1175
27	1,2	3T-C	CA31	Rupture	1554
28	1,2	3T-C	CA31	Traverse	1440
29	1,2	3T-C	CA31	Rupture	1068
30	1	1T	CA31	Arrachement	670
31	1	1T	CA31	Rupture	1379
32	1	1T	CA31	Arrachement	1461
33	1	1T	CA31	Rupture	1382
34	1	1T	CL31	Rupture	1045
35	1	1T	CL31	Rupture	1049
36	1	1T	CL31	Arrachement	461
36 bis	1	1T	CL31	Arrachement	1003

N° essai	Hauteur garde-corps (m)	Configuration	Fixation	Mode de défaillance	Force Hz max (N)
37	1,2	1T	CV231	Arrachement	828
38	1,2	1T	CV231	Arrachement	880
39	1,2	1T	CL31	Arrachement	1067,8
40	1,2	1T	CL31	Rupture	973,68
41	1,2	1T	CL31	Arrachement	1065,3
42	1,2	1T	CL31 - E	Arrêt av déf	1407,6
43	1,2	1T	CL31 - E	Arrêt av déf	1648
44	1,2	1T	CL31 - E	Arrachement	1456,3
45	1,2	1T	CL22 - AF	Arrêt av déf	1451,1
46	1,2	1T	CL22 - AF	Arrachement	1101,8
47	1,2	1T	CL22 - AF	Arrachement	839,05
47-bis	1,2	1T	CL22 - AF	Arrêt av déf	1480,4
48	1,2	1T	CL22 - AF	Arrêt av déf	1463,6
49	1,2	1T	T11	Arrêt av déf	1259,8
50	1,2	1T	T11	Arrêt av déf	1343,3
51	1,2	1T	T11	Arrêt av déf	1173,5
124	1,2	3T-C	CL31	Rupture	1575,9
125	1,2	3T-C	CL31	Traverse	1221
126	1,2	3T-C	CL31	Rupture	1260,3
175	1,2	3T-R	CA31	Arrachement	859,25
176	1,2	3T-R	CA31	Arrachement	1010,1
177	1,2	3T-R	CA31	Arrachement	1178,5
178	1,2	3T-R	CL31	Arrachement	1524,4
179	1,2	3T-R	CL31	Arrachement	1328,9
180	1,2	3T-R	CL31	Arrachement	976,72
181	1,2	3T-C	CV231	Arrachement	1075,3
188	1,2	2T-M	VB21	Traverse	1091,8
189	1,2	2T-M	VB21	Rupture	1015,4
190	1,2	2T-M	VB21	Rupture	701,53
191	1,2	2T-M	CL31 - E	Arrachement	1066,6
192	1,2	2T-M	CL31 - E	Rupture	1089,4
193	1,2	2T-M	CL31 - E	Rupture	1148,4
194	1,2	2T-M	CL31	Arrachement	712,52
195	1,2	2T-M	CL31	Traverse	921,2
196	1,2	2T-M	CL31	Rupture	602,74
197	1,2	2T-M	CL22 - AF	Arrachement	867,1
198	1,2	2T-M	CL22 - AF	Arrachement	842,64
199	1,2	2T-M	CL22 - AF	Arrachement	817,23
200	1,2	2T-M	CL33 - AF	Arrachement	1093,8
201	1,2	2T-M	CL33 - AF	Arrachement	1118,3

N° essai	Hauteur garde-corps (m)	Configuration	Fixation	Mode de défaillance	Force Hz max (N)
202	1,2	2T-M	CL33 - AF	Arrachement	709,09
203	1,2	2T-M	CL33 - AF	Arrachement	1233,6
245	1,2	1T	CL33 - AF	Arrêt av déf	1862,5
246	1,2	1T	CL33 - AF	Rupture	1489,9
247	1,2	1T	CL33 - AF	Rupture	1677,3

Tableau 37. Résultats des essais réalisés sur les solives de 14 po

N° essai	Hauteur garde-corps (m)	Configuration	Fixation	Mode de défaillance	Force Hz max (N)
88	1,2	1T	CA31	Rupture	928,95
89	1,2	1T	CA31	Arrachement	826,19
90	1,2	1T	CA31	Rupture	871,6
91	1,2	1T	CA31	Rupture	1260,8
92	1	1T	CA31	Arrachement	842,04
93	1	1T	CA31	Rupture	674,47
94	1	1T	CA31	Rupture	952,68
95	1	1T	CA31	Rupture	1674,6
96	1	1T	CL31	Arrêt av déf	1645,4
97	1	1T	CL31	Rupture	1356,6
98	1	1T	CL31	Rupture	1136
99	1,2	1T	CL31	Rupture	993,51
100	1,2	1T	CL31	Rupture	1069
101	1,2	1T	CL31	Arrachement	1100,2
102	1,2	1T	VB21	Arrêt av déf	1426,3
103	1,2	1T	VB21	Arrêt av déf	1476,7
104	1,2	1T	VB21	Rupture	1383,2
105	1,2	1T	CV231	Arrachement	1243,2
106	1,2	1T	CV231	Rupture	1282,7
107	1,2	1T	CV231	Rupture	658,39
108	1,2	1T	T11	Traverse	1164,1
109	1,2	1T	T11	Arrêt av déf	926,4
109-BIS	1,2	1T	T11	Rupture	1087,9
110	1,2	1T	T11	Rupture	1075,7
111	1,2	1T	T11	Arrêt av déf	1522,6
112	1,2	1T	CL31 - E	Arrêt av déf	1605,7
113	1,2	1T	CL31 - E	Rupture	1361,5
114	1,2	1T	CL31 - E	Rupture	1129,1
115	1,2	1T	CL22 - AF	Arrachement	1443,9
116	1,2	1T	CL22 - AF	Arrachement	1453,9
117	1,2	1T	CL22 - AF	Arrachement	861,63
117-bis	1,2	1T	CL22 - AF	Arrêt av déf	1758,8
118	1,2	3T-C	CL31	Rupture	1115,7
119	1,2	3T-C	CL31	Rupture	1016,3
120	1,2	3T-C	CL31	Rupture	996,99
120-bis	1,2	3T-C	CL31	Rupture	1135,3
121	1,2	3T-C	CA31	Rupture	1261
122	1,2	3T-C	CA31	Rupture	1295,7
123	1,2	3T-C	CA31	Traverse	1225,2

N° essai	Hauteur garde-corps (m)	Configuration	Fixation	Mode de défaillance	Force Hz max (N)
169	1,2	3T-R	CL31	Rupture	1193,1
170	1,2	3T-R	CL31	Rupture	1218,9
171	1,2	3T-R	CL31	Arrachement	1268,7
172	1,2	3T-R	CA31	Traverse	1245,6
173	1,2	3T-R	CA31	Arrachement	1004,5
174	1,2	3T-R	CA31	Rupture	1312,1
216	1,2	2T-M	CL31	Rupture	686,01
217	1,2	2T-M	CL31	Rupture	731,74
218	1,2	2T-M	CL31	Rupture	859,56
219	1,2	2T-M	CL31 - E	Arrachement	809,08
220	1,2	2T-M	CL31 - E	Rupture	1079,7
221	1,2	2T-M	CL31 - E	Rupture	1018,5
222	1,2	2T-M	CL31 - E	Arrachement	1001,8
223	1,2	2T-M	VB21	Rupture	1091,1
224	1,2	2T-M	VB21	Rupture	972,93
225	1,2	2T-M	VB21	Rupture	1005,7
226	1,2	2T-M	CL33 - AF	Rupture	1616,7
227	1,2	2T-M	CL33 - AF	Rupture	1383,3
228	1,2	2T-M	CL33 - AF	Rupture	1343,9
248	1,2	1T	CL33 - AF	Rupture	1341,2
249	1,2	1T	CL33 - AF	Rupture	753,67
250	1,2	1T	CL33 - AF	Arrêt av déf	1614,4
251	1,2	1T	CL33 - AF	Arrêt av déf	1935,5

Tableau 38. Résultats des essais réalisés sur les solives de 16 po

N° essai	Hauteur garde-corps (m)	Configuration	Fixation	Mode de défaillance	Force Hz max (N)
127	1,2	1T	CL31	Rupture	1038,5
128	1,2	1T	CL31	Traverse	1366,1
129	1,2	1T	CL31	Rupture	1266,6
130	1	1T	CL31	Rupture	1542,6
131	1	1T	CL31	Arrêt av déf	1713,4
132	1	1T	CL31	Rupture	1013,2
133	1	1T	CA31	Rupture	1416,9
134	1	1T	CA31	Rupture	1652,5
135	1	1T	CA31	Arrachement	1254,3
136	1,2	1T	CA31	Rupture	1463
137	1,2	1T	CA31	Rupture	1017,1
138	1,2	1T	CA31	Rupture	869,28
139	1,2	1T	CA31	Arrachement	1507,1
140	1,2	1T	VB21	Arrêt av déf	1627,1
141	1,2	1T	VB21	Rupture	1513,9
142	1,2	1T	VB21	Rupture	1273,4
143	1,2	1T	CV231	Rupture	1171,8
144	1,2	1T	CV231	Arrachement	1401
145	1,2	1T	CV231	Rupture	1175,1
146	1,2	1T	CL31 - E	Rupture	1233,4
147	1,2	1T	CL31 - E	Rupture	1026
148	1,2	1T	CL31 - E	Rupture	983,33
149	1,2	1T	CL31 - E	Rupture	844,87
150	1,2	1T	T11	Rupture	1159,9
151	1,2	1T	T11	Traverse	1157,4
152	1,2	1T	T11	Traverse	1264,1
153	1,2	1T	CL22 - AF	Arrachement	1101
154	1,2	1T	CL22 - AF	Arrêt av déf	1867,9
155	1,2	1T	CL22 - AF	Arrêt av déf	1807,3
156	1,2	1T	CL22 - AF	Arrêt av déf	1798
157	1,2	3T-C	CL31	Rupture	947,75
158	1,2	3T-C	CL31	Rupture	1321,7
159	1,2	3T-C	CL31	Traverse	1268,9
160	1,2	3T-C	CA31	Rupture	325,08
160-bis	1,2	3T-C	CA31	Rupture	946,63
161	1,2	3T-C	CA31	Rupture	1135,5
162	1,2	3T-C	CA31	Traverse	1501,4
163	1,2	3T-R	CA31	Arrachement	1018,4
164	1,2	3T-R	CA31	Arrêt av déf	1311,6

N° essai	Hauteur garde-corps (m)	Configuration	Fixation	Mode de défaillance	Force Hz max (N)
165	1,2	3T-R	CA31	Arrachement	1035,7
166	1,2	3T-R	CL31	Arrachement	889,66
167	1,2	3T-R	CL31	Arrachement	954,37
168	1,2	3T-R	CL31	Rupture	1228,3
229	1,2	2T-M	CL31	Rupture	658,61
230	1,2	2T-M	CL31	Arrachement	571,3
231	1,2	2T-M	CL31	Rupture	720,85
232	1,2	2T-M	CL31 - E	Rupture	906,17
233	1,2	2T-M	CL31 - E	Rupture	684,87
234	1,2	2T-M	CL31 - E	Rupture	760,42
235	1,2	2T-M	CL31 - E	Rupture	860,39
236	1,2	2T-M	VB21	Rupture	708,75
237	1,2	2T-M	VB21	Rupture	998,9
238	1,2	2T-M	VB21	Rupture	1339,9
239	1,2	2T-M	CL33 - AF	Rupture	1468,3
240	1,2	2T-M	CL33 - AF	Rupture	1402,9
241	1,2	2T-M	CL33 - AF	Rupture	1425,1
252	1,2	1T	CL33 - AF	Arrêt av déf	1832,9
253	1,2	1T	CL33 - AF	Arrêt av déf	2069,3
254	1,2	1T	CL33 - AF	Rupture	1844,2

ANNEXE B : RÉSULTATS D'ESSAIS EN LABORATOIRE POUR LE MUR PRÉBABIQUÉ

Cette annexe présente les résultats d'essais réalisés sur le mur préfabriqué. Le Tableau 39 expose les résultats d'essais pour des montants de garde-corps fixés à une hauteur de 12 po, le Tableau 40 pour une hauteur de 16 po et le Tableau 41 pour une hauteur de 24 po. Quelques essais ne sont pas retenus pour le calcul des forces de résistance moyennes, notamment :

- L'essai 52 : lors de cet essai, il y a eu un cisaillement de la vis #8 qui fixait l'équerre au mur. Le résultat d'essai est donc équivalent à un montant fixé au mur sans équerre;
- L'essai 79 : lors de cet essai, le montant a subi une rupture au niveau de trois nœuds successifs;
- L'essai 93 : le 1 po x 3 po a éclaté lors de la pose des clous. Cet essai a ensuite été repris à 4 reprises (utilisant des 1 po x 3 po neufs) afin de valider la résistance moyenne. Malgré tout, la résistance observée lors de cet essai était proche de la limite fixée par le CSTC.

Notons qu'à la suite d'une petite erreur de numérotation lors de la réalisation des essais, il y a un essai 34 et un essai 34b. Ainsi, bien que le dernier essai réalisé porte le numéro 97, c'est bien un total de 98 essais qui ont été réalisés.

Tableau 39. Résultats des essais réalisés avec une hauteur de fixation de 12 po

N° d'essai	Configuration	Fixation	Résultat				
			Mode de défaillance	Force oblique max	Angle	Force horizontale	Force verticale
				(N)	(Degré)	(N)	(N)
29	1T	CL 31	Arrachement	1412,6	12,64	1378,4	560,0
30	1T	CL 31	Arrachement	1434,5	12,79	1398,9	568,4
31	1T	CL 31	Rupture	1556,8	12,64	1519,1	591,5
32	1T	CA 31	Arrachement	1399,0	10,38	1376,1	503,0
33	1T	CA 31	Arrachement	1367,4	10,99	1342,3	511,5
34	1T	CA 31	Arrachement	1150,3	9,62	1134,1	443,2
34-b	1T	VB 21	Rupture	1511,8	11,89	1479,4	562,4
35	1T	VB 21	Rupture	1250,8	10,99	1227,9	489,3
36	1T	VB 21	Rupture	1500,7	12,04	1467,7	564,0
37	1T	T 11	Rupture	1168,7	11,44	1145,5	482,7
38	1T	T 11	Rupture	1148,2	11,44	1125,4	478,7
39	1T	T 11	Arrachement	1240,2	12,79	1209,5	525,4
40	2T-M	T 11	Arrachement	629,0	11,14	617,1	372,5
41	2T-M	T 11	Arrachement	438,3	13,53	426,2	353,5
42	2T-M	T 11	Rupture	615,0	13,82	597,1	397,9
43	2T-M	VB 21	Rupture	804,6	13,97	780,8	445,2
44	2T-M	VB 21	Rupture	1172,7	13,38	1140,9	522,3
45	2T-M	VB 21	Rupture	983,7	12,49	960,4	463,7
46	2T-M	CL 31	Arrachement	724,6	13,23	705,4	416,8
47	2T-M	CL 31	Rupture	663,1	12,93	646,2	399,4
48	2T-M	CL 31	Rupture	823,4	13,97	799,1	449,8
49	2T-M	CA 31	Arrachement	490,6	13,08	477,9	362,0
50	2T-M	CA 31	Arrachement	611,6	11,44	599,5	372,3
51	2T-M	CA 31	Arrachement	438,5	12,64	427,8	346,9
52	2T-M	CL31 - E	Arrachement	539,1	13,38	524,5	375,7
53	2T-M	CL31 - E	Rupture	1220,3	13,97	1184,2	545,6
54	2T-M	CL31 - E	Rupture	1200,0	11,74	1174,9	495,1
55	2T-M	CL31 - E	Rupture	997,3	11,14	978,6	443,6
56	1T	CL31 - E	Rupture	1225,4	12,34	1197,1	512,8
57	1T	CL31 - E	Rupture	1842,8	12,64	1798,2	654,1
58	1T	CL31 - E	N/A	2071,9	12,04	2026,3	683,1
90	3T-C	CL 31	Arrachement	1393,2	12,49	1360,2	552,2
91	3T-C	CL 31	Arrachement	1282,8	11,14	1258,6	498,7
92	3T-C	CL 31	Arrachement	1173,0	11,74	1148,5	489,6

Tableau 40. Résultats des essais réalisés avec une hauteur de fixation de 16 po

Num d'essai	Configuration	Fixation	Résultat				
			Mode défaillance	Force oblique max	Angle	Force horizontale	Force verticale
				(N)	(Degré)	(N)	(N)
1	1T	CL 31	Arrachement	1120,4	10,53	1101,5	204,8
2	1T	CL 31	Rupture	1031,3	12,79	1005,7	228,2
3	1T	CL 31	Arrachement	1229,3	11,74	1203,6	250,1
4	2T-M	CL 31	Arrachement	829,1	13,53	806,1	194,0
5	2T-M	CL 31	Rupture	792,5	11,44	776,8	157,2
6	2T-M	CL 31	Arrachement	760,8	11,14	746,5	146,9
7	2T-M	T 11	Rupture	832,9	11,74	815,5	169,4
8	2T-M	T 11	Arrachement	1126,6	13,23	1096,7	257,9
9	2T-M	T 11	Arrachement	1070,9	12,93	1043,7	239,7
10	2T-M	VB 21	Rupture	1052,1	13,38	1023,5	243,5
11	2T-M	VB 21	Rupture	1108,3	12,19	1083,3	234,0
12	2T-M	VB 21	Rupture	770,7	12,93	751,1	172,5
13	2T-M	VB 21	Rupture	906,8	13,08	883,2	205,3
14	1T	VB 21	Rupture	1009,8	12,34	986,5	215,8
15	1T	VB 21	Rupture	1616,0	11,74	1582,2	328,8
16	1T	VB 21	Rupture	1206,4	12,79	1176,5	267,0
17	1T	CA 31	Arrachement	999,3	12,34	976,2	464,5
18	1T	CA 31	Arrachement	1475,5	10,83	1449,2	528,3
19	1T	CA 31	Arrachement	1204,7	10,38	1185,0	468,0
20	2T-M	CA 31	Arrachement	658,7	12,49	643,2	393,4
21	2T-M	CA 31	Arrachement	529,1	12,49	516,6	365,4
22	2T-M	CA 31	Arrachement	784,1	10,53	770,9	394,3
23	2T-M	CL31 - E	Rupture	1206,3	14,12	1169,9	545,2
24	2T-M	CL31 - E	Rupture	1022,5	13,53	994,1	490,2
25	2T-M	CL31 - E	Arrachement	897,6	13,82	871,6	465,4
26	3T-C	T 11	Rupture	1465,3	10,83	1439,2	526,4
27	3T-C	T 11	Arrachement	1108,0	13,38	1077,9	507,4
28	3T-C	T 11	Arrachement	1028,3	10,53	1011,0	438,9

Tableau 41. Résultats des essais réalisés avec une hauteur de fixation de 24 po

N° d'essai	Configuration	Fixation	Résultat				
			Mode de défaillance	Force oblique max	Angle	Force horizontale	Force verticale
				(N)	(Degré)	(N)	(N)
59	1T	CA 31	Arrachement	1190,3	12,04	1164,1	499,2
60	1T	CA 31	Arrachement	924,9	12,19	904,0	446,2
61	1T	CA 31	Arrachement	1136,8	12,34	1110,5	493,9
62	1T	CL 31	Arrachement	1226,0	11,74	1200,4	500,4
63	1T	CL 31	Arrachement	1400,3	12,04	1369,5	543,0
64	1T	CL 31	Arrachement	1254,6	11,59	1229,0	503,0
65	1T	VB 21	Arrachement	1575,6	12,34	1539,2	587,6
66	1T	VB 21	Rupture	1581,2	11,89	1547,3	576,7
67	1T	VB 21	Rupture	1123,0	10,83	1103,0	462,1
68	1T	T 11	Arrachement	1238,5	11,44	1213,9	496,6
69	1T	T 11	Arrachement	1239,4	11,59	1214,1	499,9
70	1T	T 11	Rupture	1405,5	10,53	1381,8	507,9
71	2T-M	CL 31	Rupture	553,2	13,53	537,9	380,4
72	2T-M	CL 31	Rupture	625,4	13,68	607,7	398,8
73	2T-M	CL 31	Rupture	741,8	12,19	725,1	407,6
74	2T-M	CA 31	Rupture	784,6	12,93	764,7	426,6
75	2T-M	CA 31	Arrachement	757,6	12,34	740,1	412,9
76	2T-M	CA 31	Arrachement	497,7	13,68	483,6	368,6
77	2T-M	VB 21	Arrachement	1088,3	13,38	1058,8	502,8
78	2T-M	VB 21	Rupture	1136,7	11,89	1112,3	485,1
79	2T-M	VB 21	Rupture	634,8	13,08	618,3	394,7
80	2T-M	VB 21	Arrachement	1166,5	13,97	1132,0	532,6
81	2T-M	CL31 - E	Arrachement	1601,3	13,97	1553,9	637,6
82	2T-M	CL31 - E	Rupture	1704,5	14,12	1653,0	666,8
83	2T-M	CL31 - E	Rupture	1052,0	13,23	1024,1	491,8
84	2T-M	T 11	Arrachement	928,3	12,93	904,8	458,8
85	2T-M	T 11	Rupture	852,3	12,19	833,0	430,9
86	2T-M	T 11	Arrachement	658,6	11,14	646,2	378,2
87	1T	CL31 - E	Rupture	1928,9	11,89	1887,5	648,3
88	1T	CL31 - E	Rupture	1286,8	12,19	1257,8	522,6
89	1T	CL31 - E	Rupture	1458,0	12,04	1425,9	555,1
93	3T-C	CL 31	Arrachement	871,9	10,83	856,4	414,9
94	3T-C	CL 31	Arrachement	1307,0	10,99	1283,1	500,0
95	3T-C	CL 31	Arrachement	1339,1	10,68	1315,9	499,2
96	3T-C	CL 31	Arrachement	1343,8	10,83	1319,8	503,6
97	3T-C	CL 31	Arrachement	1499,1	10,83	1472,4	532,8

Au total, 98 essais ont été réalisés, dont 97 ont été menés jusqu'à la défaillance par arrachement ou rupture du montant. Notons 54 % de défaillance par arrachement et 46 % de défaillance par rupture : il ne semble pas y avoir de mode de défaillance privilégié *a priori*. L'analyse détaillée du mode de défaillance en fonction du mode de fixation, de la hauteur de la fixation et de la configuration d'essai est présentée aux sections suivantes.

Notons que, dans le cas de la fixation de montants en 2 po x 4 po sur un mur préfabriqué, c'est la partie large du 2 po x 4 po qui est posée à plat contre le mur. En conséquence, le montant ne respecte pas les exigences de conception prescrites par le CSTC, mais correspond à la réalité observée sur les chantiers de construction.

ANNEXE C : DIMENSIONS DU MUR PRÉFABRIQUÉ

Cette annexe présente de manière détaillée les dimensions du mur préfabriqué qui a été reconstitué au laboratoire, et le contreventement qui a été mis en place pour limiter le déplacement horizontal.

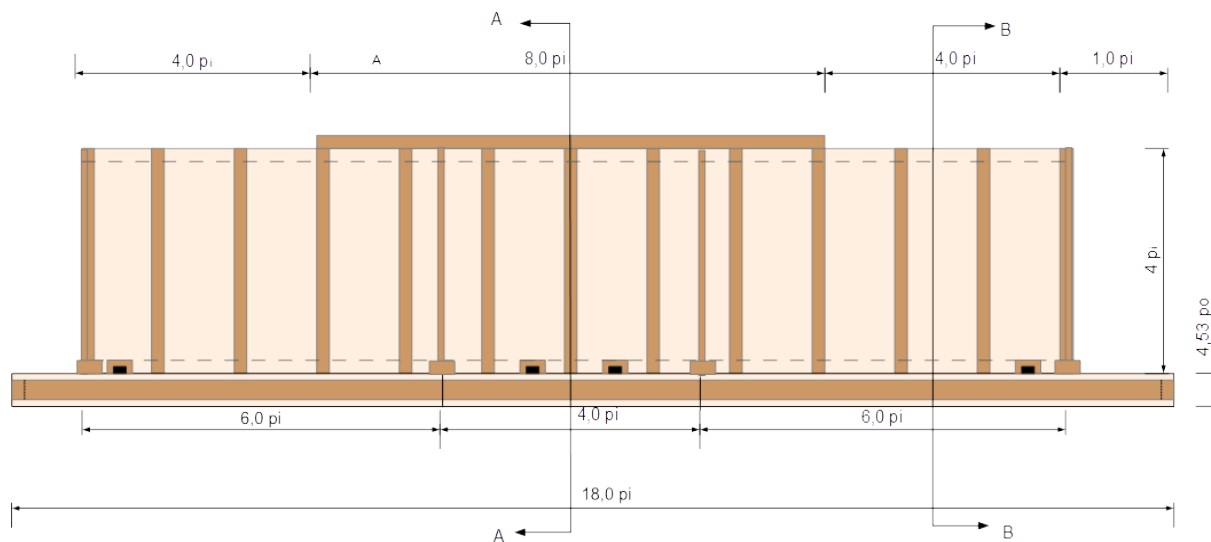


Figure 73. Vue de face du mur préfabriqué.

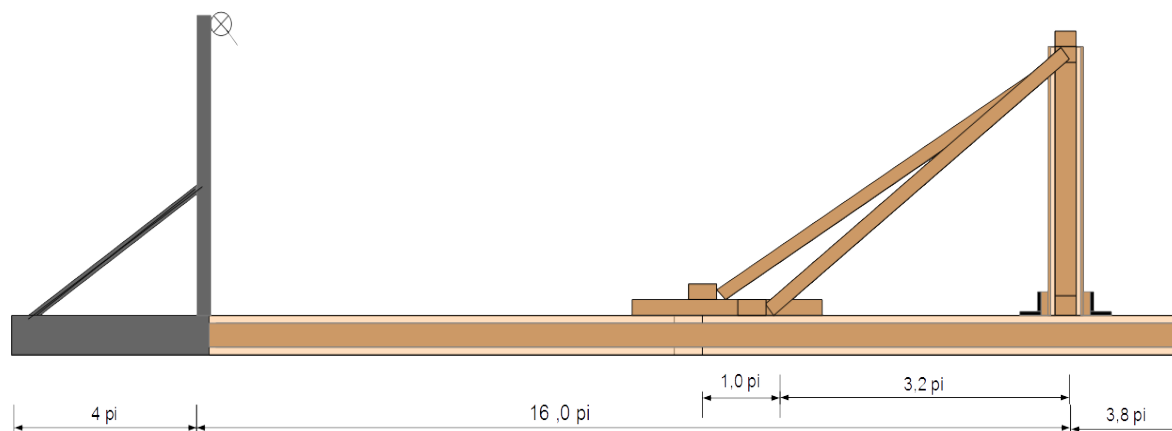


Figure 74. coupe A - A.

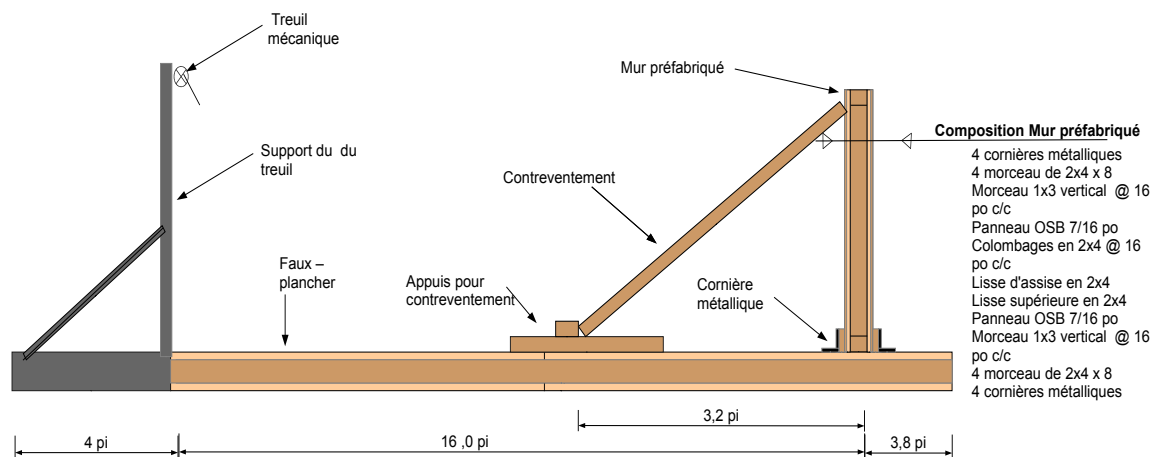


Figure 75. Coupe B – B.

Pour effectuer les essais, les garde-corps sont montés sur le mur préfabriqué. Ce dernier est solidement fixé sur le faux-plancher pour permettre la réalisation des essais sans risque d'erreur en matière de résultats observés, à l'aide de cornières en acier de dimensions 51 mm x 51 mm x 6,4 mm et de 7,5 cm de long chacune. Un total de quatre paires des cornières sont utilisées pour maintenir le mur sur le faux plancher. Un morceau de 2 po x 4 po d'environ 8 cm de long est placé entre chaque cornière et le mur préfabriqué pour assurer un bon contact. Chaque cornière est fixée au faux plancher à l'aide de 2 vis # 8 et au mur préfabriqué à l'aide de 2 vis #10.

Pour éviter le basculement du mur préfabriqué vers l'avant ou l'arrière, quatre morceaux de 2 po x 4 po servant de contreventement oblique sont installés entre le mur et le faux plancher à l'aide de vis # 10. Deux sont installés aux extrémités gauche et droite du mur préfabriqué et deux autres au centre du mur préfabriqué vis-à-vis des extrémités du faux plancher secondaire (Figure 76).



Figure 76. Contreventements du mur préfabriqué.

La Figure 77 présente les dimensions du système et les hauteurs minimales et maximales de la lisse du garde-corps pour les essais sur le mur préfabré.

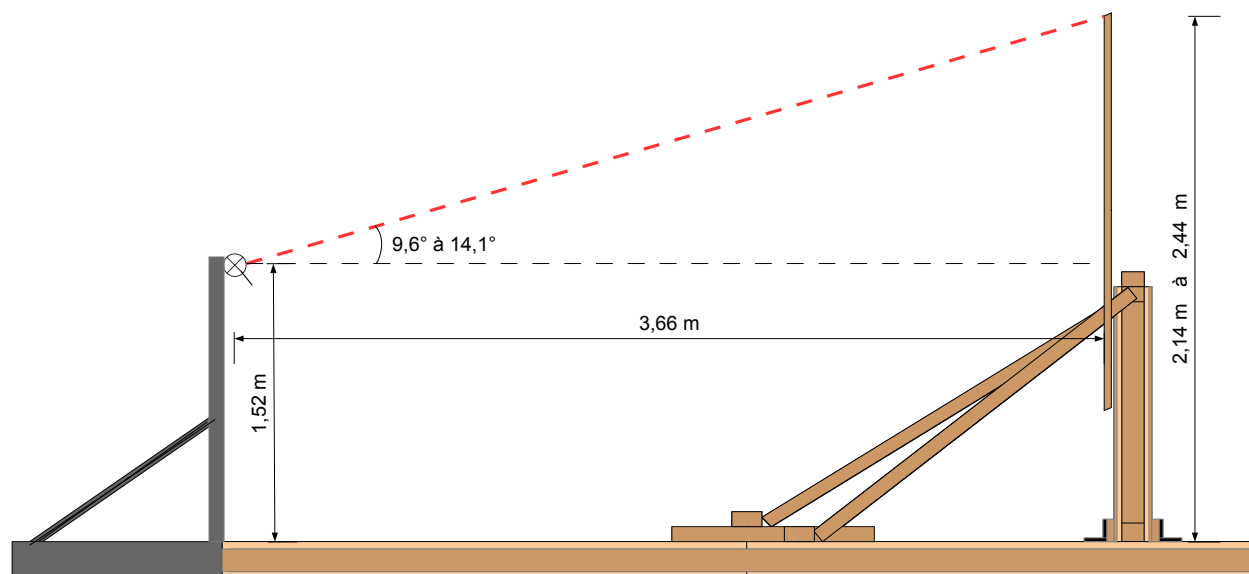


Figure 77. Dimensions du système en angle de la force oblique appliquée sur les garde-corps.