

Critères de stabilité des échelles et des escabeaux

Bertrand Galy

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

R-1113



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
2020
ISBN : 978-2-89797-139-7
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
Octobre 2020

Critères de stabilité des échelles et escabeaux

Bertrand Galy

IRSST

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

R-1113



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 :

- Les équipes de « Nouvelle hauteur » et « Labex » pour la réalisation des essais;
- Louis Genest et Henri Bernard, Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST);
- Lynda Poulin, Association des professionnels de la construction et de l'habitation du Québec (APCHQ);
- Bertrand Gauthier, Confédération des syndicats nationaux (CSN-Construction);
- Martin Lemieux, Syndicat québécois de la construction (SQC);
- Sylvie L'Heureux, Association paritaire pour la santé et la sécurité du travail du secteur de la construction (ASP Construction);
- Patricia Vega, Association sectorielle « Fabrication d'équipement de transport et de machines » (ASFETM);
- Michel Gagnon, Auto Prévention;
- Éric Nantel, Conseil provincial du Québec des métiers de la construction (CPQMC);
- Julie Gaudin, Multiprésentation;
- Valérie Hensley, Association paritaire pour la santé et la sécurité du travail du secteur affaires sociales (ASSTSAS);
- Marie-Claude Larivière, Association paritaire pour la santé et la sécurité du travail, secteur « affaires municipales » (APSAM);
- Catherine Pessoa, Via Prévention.

SOMMAIRE

Les chutes de hauteur sont encore aujourd'hui une des principales causes d'accident au Québec, et la deuxième cause en termes de coûts sur la période 2010 – 2012, avec une moyenne de 397 millions de dollars par année. Selon la CNESST, les statistiques de lésions impliquant les échelles, que ce soit en construction ou en établissement, montrent une augmentation au fil des ans (période de 2007 à 2012) et sur la période 2009 à 2013, 20 % des lésions dues à une chute de hauteur ont été causées par une chute à partir d'une échelle.

Un des principaux critères affectant la stabilité des échelles est l'angle d'inclinaison de celle-ci. De cet angle découle la stabilité de l'échelle pour le glissement du pied et du basculement en arrière. L'angle idéal se situe autour de 75 ° afin d'éviter le glissement du pied, mais un angle important rend la probabilité de basculement en arrière plus grande. Au Québec, le Code de sécurité pour les travaux de construction impose un angle compris entre 75,5 ° et 70,5 °. Ce critère est aussi présent dans le Règlement sur la santé et la sécurité du travail.

L'étude présentée vise à déterminer les limites de stabilité lors de l'utilisation d'échelles portatives et escabeaux. Ces limites de stabilité ont été déterminées en fonction du type de surface en pied et en tête d'échelle, de la hauteur du travailleur sur l'échelle, et pour des angles inclus dans les limites fixées par les règlements provinciaux : 70,5 ° et 75,5 °, pour différentes positions. Les essais ont été réalisés en laboratoire.

Deux échelles commerciales de 24 pieds (7,3 m) ont été utilisées pour les essais. La première est en aluminium, tandis que la seconde est en fibre de verre. Ces deux échelles sont conformes à la norme CSA Z11 et de classe 1A (*extra heavy duty*). Des escabeaux en aluminium de 12 pieds (ESC12) et 6 pieds (ESC6) ont également été utilisés pour les essais, et sont, comme les échelles, conformes à la norme CSA Z11 et de classe 1A. Deux expérimentateurs de taille et poids différents ont participé à la réalisation des essais, leur poids a été modifiée en utilisant une veste et une ceinture lestées. Les forces ont été mesurées par des plateformes de force et enregistrées via un logiciel d'acquisition des données, à une fréquence de 100 Hz.

Dans un premier temps, des essais préliminaires pour différentes surfaces d'appui ont été réalisés afin d'identifier les cas critiques. En pied d'échelle, le béton lisse et le carrelage ont été considérés, mouillés ou secs. Au sommet de l'échelle, le gypse, le bois, l'acier et l'aluminium ont été considérés, et certains essais ont été faits avec l'échelle en appui sur ses montants. Les surfaces critiques en pied et au sommet de l'échelle sont respectivement : le carrelage et l'acier. Les essais subséquents ont été réalisés avec ces surfaces d'appui.

L'ordre de réalisation des essais a été partiellement randomisé pour éliminer les biais expérimentaux. En tout, un peu plus de 300 essais de stabilité ont été réalisés sur les échelles escabeaux. Les expérimentateurs ont réalisé une séquence de mouvements dans le même ordre pour chaque essai :

1. Position de départ : debout, droit, au repos;
2. Position 1 (P1) : reculé, bras tendus;
3. Position 2 (P2) : penché sur le côté, main sur l'échelon de l'échelle;
4. Position 3 (P3) : retourné en se tenant avec une seule main, bras tendu si possible.

Dans le cas d'une échelle non déployée, pour l'opérateur E1 (le plus grand et lourd), le risque d'instabilité est présent aux échelons 2 et 3 pour tous les angles d'installation et positions; à l'échelon 4 pour tous les angles d'installation dans le cas des positions P1 et P3; et aux échelons 5 et 6 dans le cas de la position P3 pour des angles d'installation de 72,5 ° et 75 ° respectivement. En d'autres termes, plus l'angle d'installation est important, plus le risque de basculement arrière est grand, et présent jusqu'à une hauteur importante sur l'échelle.

Le matériau de l'échelle influe également sur le risque d'instabilité : plus l'échelle est lourde (fibre de verre), moins le risque d'instabilité est grand. Choisir une échelle en fibre de verre permet d'abaisser l'échelon pour lequel le risque d'instabilité existe, cependant, une échelle plus lourde entraîne des contraintes supplémentaires pour sa mise en place et sa maintenance, qui doivent également être considérées.

Par la suite, un modèle analytique a été développé et validé sur la base des résultats expérimentaux afin de généraliser les conclusions de l'étude. L'étude paramétrique menée à l'aide de modèles analytiques a permis de valider les observations faites lors des essais et de généraliser les conclusions pour les échelles déployées et non déployées. Plus le travailleur sera lourd, plus le risque d'instabilité sera présent sur des échelons assez hauts par rapport au sol (5^e ou 6^e échelon suivant les positions). La taille du travailleur est également un facteur influençant le risque de perte de stabilité : un travailleur plus grand présente un risque d'instabilité plus important, mais ce paramètre est moins déterminant que le poids du travailleur. Finalement, une échelle plus légère, notamment une échelle simple de 8 pieds, présente un risque accru de perte de stabilité, jusqu'au 4^e ou 5^e échelon suivant l'angle d'installation, et ce, même pour un travailleur très léger (50 kg).

Pour les essais de montée d'échelle, à des angles de 72,5 ° et 75 °, un risque de basculement arrière existe si le travailleur monte face à l'échelle. L'utilisation d'une technique adaptée, en montant les premiers échelons de l'échelle de côté, permet de limiter, voire d'éliminer le risque de basculement arrière. Une bonne formation est donc nécessaire pour utiliser adéquatement une échelle et savoir comment monter de manière sécuritaire.

Les escabeaux de faible hauteur, très légers et d'empannement réduit, présentent des risques d'instabilité majeurs, même pour les travailleurs légers et de petite taille. Leur utilisation devrait être faite en connaissance de cause, et il serait souhaitable de rappeler aux travailleurs qu'une chute, même de hauteur limitée, peut générer des blessures graves et un arrêt de travail.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	i
SOMMAIRE	iii
LISTE DES TABLEAUX	ix
LISTE DES FIGURES	xi
LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xvii
1. INTRODUCTION	1
1.1 Chutes de hauteur et proportion reliée aux échelles et escabeaux.....	1
1.1.1 Coût des chutes de hauteur.....	1
1.1.2 Chutes des échelles et escabeaux	1
2. OBJECTIFS DE RECHERCHE	3
3. ÉTAT DES CONNAISSANCES	5
3.1 Critères de stabilité des échelles et escabeaux	5
3.1.1 Angle d'inclinaison	6
3.1.2 Autres critères affectant la stabilité	7
3.2 Exigences du CSTC	8
3.3 Problématiques en suspens	10
4. MÉTHODOLOGIE	11
4.1 Matériel d'essai et instrumentation	11
4.1.1 Échelles et escabeaux utilisés pour les essais	11
4.1.2 Expérimentateurs.....	13
4.1.3 Instrumentation pour les échelles	14
4.1.4 Surfaces d'appui pour les pieds et le sommet de l'échelle	16
4.1.5 Instrumentation pour les escabeaux.....	17
4.1.6 Laboratoire d'essais.....	18
4.2 Stabilité des échelles.....	18
4.2.1 Configurations d'essai et séquence de mouvements	18
4.2.2 Essais préliminaires sur différentes surfaces.....	21
4.2.3 Matrice des essais pour l'échelle non déployée	24
4.2.4 Matrice des essais pour l'échelle déployée	25
4.3 Stabilité des escabeaux	26
4.3.1 Configurations d'essai et séquence de mouvements	26
4.3.2 Matrice des essais sur les escabeaux	28

5.	RÉSULTATS D'ESSAIS	29
5.1	Essais préliminaires sur les échelles : surfaces d'appui en pied et au sommet	29
5.1.1	Estimation des coefficients de friction.....	29
5.1.2	Essais de stabilité pour les différentes surfaces d'appui	32
5.2	Essais de stabilité sur les échelles.....	34
5.2.1	Interprétation des forces mesurées en pied et au sommet de l'échelle.....	34
5.2.2	Échelle non déployée	36
5.2.3	Échelle déployée	53
5.3	Essais de stabilité sur les escabeaux.....	58
5.3.1	Interprétation des forces mesurées aux pieds de l'escabeau.....	58
5.3.2	Escabeau de 6 pieds	60
5.3.3	Escabeau de 12 pieds	61
6.	MODÈLE ANALYTIQUE	65
6.1	Comparaison des résultats théoriques et expérimentaux pour les échelles	65
6.1.1	Échelle seule	65
6.1.2	Expérimentateur au repos	66
6.1.3	Expérimentateur dans la position P1	67
6.1.4	Expérimentateur dans la position P3.....	69
6.2	Comparaison des résultats théoriques et expérimentaux pour les escabeaux	71
6.2.1	Escabeau seul	71
6.2.2	Expérimentateur au repos	71
6.2.3	Expérimentateur dans la position P1	72
6.2.4	Expérimentateur dans la position P2.....	73
6.2.5	Expérimentateur dans la position P3.....	74
6.3	Étude paramétrique.....	74
6.3.1	Échelles	75
6.3.2	Escabeaux.....	80
6.4	Limite de force latérale pour les échelles	83
6.5	Limite de force latérale pour les escabeaux.....	85
7.	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	87
7.1	Surfaces d'appui critiques pour les échelles	87
7.2	Limites de stabilité pour les échelles.....	87
7.3	Limites de stabilité pour les escabeaux.....	89
7.4	Recommandations générales sur l'utilisation d'échelles et escabeaux.....	89
7.5	Limites de l'étude et recommandations pour de futures études	90
	BIBLIOGRAPHIE	93
	ANNEXE A : ÉVALUATION DE LA POSITION DES CDG.....	97

A.I	Notations	97
A.II	Évaluation de la position des CDG pour les échelles.....	99
A.II.I	CDG _{av-arr}	99
A.II.II	CDG _{gch-dte}	100
A.III	Évaluation de la position des CDG pour les escabeaux.....	102
A.III.I	CDG _{av-arr}	102
A.III.II	CDG _{gch-dte}	103

ANNEXE B : DÉVELOPPEMENT DES MODÈLES ANALYTIQUES 105

B.I	Notations	105
B.II	Équilibre des forces pour une échelle	106
B.II.I	Échelle seule	106
B.II.II	Expérimentateur au repos	106
B.II.III	Expérimentateur dans les positions P1 et P3	108
B.II.IV	Expérimentateur dans la position P2	111
B.III	Équilibre des forces pour un escabeau	112
B.III.I	Escabeau seul	112
B.III.II	Expérimentateur au repos	112
B.III.III	Expérimentateur dans les positions P1 et P3	114
B.III.IV	Expérimentateur dans la position P2	115
B.III.V	Limite de force latérale	116
B.IV	Valeurs numériques des différents paramètres pour les modèles analytiques	118

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Caractéristiques des escabeaux testés.....	12
Tableau 2.	Caractéristiques physiques des expérimentateurs.....	13
Tableau 3.	Mise en place de l'échelle	18
Tableau 4.	Positions de l'expérimentateur pour la vérification de la stabilité de l'échelle	19
Tableau 5.	Configurations d'essais pour identifier les conditions critiques d'appui.....	22
Tableau 6.	Matrice des essais pour l'échelle non déployée.....	24
Tableau 7.	Matrice des essais pour l'échelle déployée	25
Tableau 8.	Positions de l'expérimentateur pour la vérification de la stabilité de l'escabeau	26
Tableau 9.	Matrice des essais pour les escabeaux.....	28
Tableau 10.	Résumé des coefficients de frottement pour chaque surface	31
Tableau 11.	Demandes maximales en friction pour l'échelle appuyée en son sommet.....	32
Tableau 12.	Demandes maximales en friction pour l'échelle appuyée sur ses montants	32
Tableau 13.	Risque d'instabilité en fonction de l'angle et de la hauteur sur l'échelle pour E1	39
Tableau 14.	Risque d'instabilité en fonction de l'angle et de la hauteur sur l'échelle pour E2	40
Tableau 15.	Distance entre le CDG au repos et en position pour E2, en fonction de la hauteur sur l'échelle, pour une échelle en aluminium non déployée installée à 72,5 °	42
Tableau 16.	Distance entre le CDG au repos et en position pour les expérimentateurs, en fonction de la hauteur sur l'échelle, pour une échelle en aluminium non déployée installée à 75 °	43
Tableau 17.	Risque d'instabilité en fonction de la position.....	61
Tableau 18.	Risque d'instabilité en fonction de la position.....	63
Tableau 19.	Position du CDG de l'échelle selon les méthodes analytique et expérimentale.....	65
Tableau 20.	Position des CDGs des escabeaux selon les méthodes analytique et expérimentale.....	71
Tableau 21.	Valeur de l'angle β en fonction de l'échelon, pour l'escabeau de 12 pieds.....	73
Tableau 22.	Propriétés des travailleurs fictifs utilisés dans l'étude paramétrique	74
Tableau 23.	Propriétés des échelles utilisées dans l'étude paramétrique.....	75
Tableau 24.	Propriétés des escabeaux utilisés dans l'étude paramétrique	80
Tableau 25.	Valeurs des différents paramètres des échelles pour les modèles analytiques	118

Tableau 26.	Valeurs des différents paramètres des escabeaux pour les modèles analytiques	118
Tableau 27.	Valeurs des différents paramètres relatifs aux expérimentateurs pour les modèles analytiques.....	118

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Modes de perte de stabilité des échelles.	5
Figure 2.	Modes de perte de stabilité des escabeaux.	6
Figure 3.	Mise en place d'une échelle selon le CSTC ou le RSST.....	7
Figure 4.	Échelles utilisées pour les essais.	11
Figure 5.	Escabeaux utilisés pour les essais.....	12
Figure 6.	Position des cellules de charge pour mesurer les forces sur l'échelle.	15
Figure 7.	Dispositif de mesure avec plateformes de force.....	15
Figure 8.	Dispositif de mesure des forces en pied d'échelle avec la surface en béton lisse (sangle pour les essais préliminaires de mesure de friction).	16
Figure 9.	Surfaces d'appui au sommet de l'échelle : (a) coin en acier, (b) acier, (c) gypse et (d) brique de béton.	16
Figure 10.	Surfaces d'appuis en pied d'échelle : (a) béton lisse et (b) carrelage.	17
Figure 11.	Position des plateformes de force pour mesurer les forces en pied de l'escabeau.	17
Figure 12.	Installation des échelles dans le laboratoire d'essais.....	18
Figure 13.	Vérification de la stabilité de l'échelle - Position de départ.....	19
Figure 14.	Vérification de la stabilité de l'échelle - Position 1 : reculé (P1).	20
Figure 15.	Vérification de la stabilité de l'échelle - Position 2 : côté (P2).	20
Figure 16.	Vérification de la stabilité de l'échelle - Position 3 : retourné (P3).....	20
Figure 17.	Échelle appuyée en son sommet (à gauche) ou sur les montants (à droite).	23
Figure 18.	Application d'une force horizontale au bas de l'échelle pour déterminer le coefficient de friction.....	23
Figure 19.	Vérification de la stabilité de l'escabeau - Position de départ.	26
Figure 20.	Vérification de la stabilité de l'escabeau - Position 1 : reculé (P1).....	27
Figure 21.	Vérification de la stabilité de l'escabeau - Position 2 : côté (P2).	27
Figure 22.	Vérification de la stabilité de l'escabeau - Position 3 : retourné (P3).	27
Figure 23.	Coefficient de friction calculé au sommet de l'échelle en fonction de la surface d'appui.	29
Figure 24.	Coefficient de friction calculé lorsque l'échelle est appuyée sur les montants, en fonction de la surface d'appui.	30
Figure 25.	Coefficient de friction calculé au pied de l'échelle, en fonction de la surface d'appui.	31
Figure 26.	Demande en friction au pied de l'échelle pour l'essai M21-70-COINBOIS-CAR-15-SD-1.	33

Figure 27.	Demande en friction au pied de l'échelle pour l'essai M21-70-COINACIER-CARWET-15-SD-1.	33
Figure 28.	Résultat de l'essai M12-75-ACIER-CAR-6-SD-E2-2 – Forces en pied et tête d'échelle.	35
Figure 29.	Résultat de l'essai M12-75-ACIER-CAR-6-SD-E2-2 – Position du CDG calculée.	35
Figure 30.	Résultat de l'essai M12-75-ACIER-CAR-6-SD-E2-2 – Demande en friction horizontale (au pied) et latérale (au sommet).	36
Figure 31.	Résultats des essais M12-75 - Position du CDG.	37
Figure 32.	Comparaison des distances au CDG échelle-expérimentateur pour les positions 1 et 3.	38
Figure 33.	Comparaison des distances au CDG échelle-expérimentateur pour les positions reculé et retourné, dans le cas d'une échelle installée à 72,5 °.	38
Figure 34.	Comparaison des distances au CDG échelle-expérimentateur 1 pour une échelle en aluminium non déployée installée à différents angles.	39
Figure 35.	Comparaison des distances au CDG échelle-expérimentateur 2 pour une échelle en aluminium non déployée installée à différents angles.	40
Figure 36.	Comparaison des distances au CDG échelle-expérimentateur pour une échelle en aluminium non déployée installée à 75 °.	41
Figure 37.	Comparaison des distances au CDG échelle-expérimentateur pour une échelle en aluminium non déployée installée à 72,5 °.	41
Figure 38.	Comparaison des distances au CDG échelle-expérimentateur 2 pour une échelle en aluminium ou en fibre de verre non déployée, installée à 75 °.	43
Figure 39.	Transmission d'un poids de 25 lb sur le côté.	44
Figure 40.	Position du CDG latéral échelle-expérimentateur 1 lors de la transmission d'un poids de 25 lb, pour une échelle non déployée installée à 75 °.	44
Figure 41.	Comparaison des distances au CDG échelle-expérimentateur 1 lors de la transmission d'un poids de 25 lb.	45
Figure 42.	Demande en friction au sommet lors de la transmission d'un poids de 25 lb, pour une échelle non déployée installée à 70 ° et un expérimentateur sur l'échelon 5.	46
Figure 43.	Demande en friction latérale lors de la transmission d'un poids de 25 lb, pour une échelle non déployée installée à 75 ° et un expérimentateur sur l'échelon 7.	46
Figure 44.	Vissage sur le côté de l'échelle.	47
Figure 45.	Vissage entre les montants de l'échelle.	47
Figure 46.	Position des CDG échelle-expérimentateur 1 lors du vissage sur le côté ou entre les montants de l'échelle.	48
Figure 47.	Demande en friction au sommet lors du vissage sur le côté ou entre les montants de l'échelle.	48

Figure 48.	Résultat de l'essai M12-72,5-ACIER-CAR-MontéeCôté – Force horizontale au mur (au sommet) et force verticale (au pied).....	49
Figure 49.	Expérimentateur 1 se hissant sur le premier échelon de l'échelle, installée à 72,5 °, avec la technique de face (a) et de côté (b).....	50
Figure 50.	Expérimentateur 1 se hissant sur le deuxième échelon de l'échelle, installée à 72,5 °, avec la technique de face (a) et de côté (b).....	51
Figure 51.	Distance du CDG lors de la montée et de la descente de E1, pour une échelle en aluminium non déployée, installée à 72,5 °.	52
Figure 52.	Distance du CDG lors de la montée et de la descente de E2, pour une échelle non déployée, installée à 75 °.....	53
Figure 53.	Résultats des essais M21-70 : position du CDG et risque de retournement ou basculement arrière, E2.	54
Figure 54.	Comparaison des distances au CDG échelle-expérimentateur pour les positions reculé et retourné.	54
Figure 55.	Comparaison des distances au CDG échelle-expérimentateur 2 pour une échelle en aluminium déployée installée à différents angles.....	55
Figure 56.	Comparaison des distances au CDG échelle-expérimentateur pour une échelle en aluminium déployée installée à 75 °.	56
Figure 57.	Comparaison des distances au CDG échelle-expérimentateur pour une échelle en aluminium déployée installée à 70 °.	56
Figure 58.	Comparaison des distances au CDG échelle-expérimentateur 2 pour une échelle en aluminium ou en fibre de verre, déployée, installée à 75 °.	57
Figure 59.	Distance du CDG lors de la montée et de la descente pour une échelle déployée, installée à 70 °.	58
Figure 60.	Résultat de l'essai ESC12-5-E1-SD-3 – Forces verticales mesurées sur chacun des pieds de l'escabeau.	59
Figure 61.	Résultat de l'essai ESC12-5-E1-SD-3 – Position du CDG calculée.....	59
Figure 62.	Résultats des essais ESC6 : position du CDG et risque de retournement ou basculement arrière.....	60
Figure 63.	Comparaison des distances au CDG escabeau-expérimentateur pour les positions reculé et retourné.	61
Figure 64.	Résultats des essais ESC12 : position du CDG et risque de retournement ou basculement arrière.....	62
Figure 65.	Comparaison des distances au CDG escabeau-expérimentateur pour les positions reculé et retourné.	62
Figure 66.	Comparaison des valeurs expérimentales et théoriques, pour E1 avec H1.....	66
Figure 67.	Comparaison des valeurs expérimentales et théoriques, dans le cas d'une inclinaison au repos de 5 °, pour E1.....	66
Figure 68.	Comparaison des valeurs expérimentales et théoriques, dans le cas d'une inclinaison au repos de 5 °, pour E2.....	67

Figure 69.	Comparaison des valeurs expérimentales et théoriques pour la position P1, pour un angle β de 16 °	68
Figure 70.	Comparaison des valeurs expérimentales et théoriques pour la position P1, pour un angle β de 21 °	69
Figure 71.	Comparaison des valeurs expérimentales et théoriques pour la position P3, pour un angle β de 25 °	70
Figure 72.	Comparaison des valeurs expérimentales et théoriques, pour un expérimentateur au repos.	72
Figure 73.	Comparaison des valeurs expérimentales et théoriques, pour un expérimentateur dans la position P1.	72
Figure 74.	Comparaison des valeurs expérimentales et théoriques, pour un expérimentateur dans la position P2.	73
Figure 75.	Comparaison des valeurs expérimentales et théoriques, pour un expérimentateur dans la position P3.	74
Figure 76.	Influence du poids et de la taille du travailleur sur la position du CDG du système échelle-travailleur, pour l'échelle de 24" en aluminium, non déployée, position P1.	75
Figure 77.	Influence du poids et de la taille du travailleur pour l'échelle déployée sur la position du CDG du système échelle-travailleur, position P1.....	76
Figure 78.	Influence du poids et de la taille du travailleur pour l'échelle non déployée sur la position du CDG du système échelle-travailleur, position P3.	76
Figure 79.	Influence du poids et de la taille du travailleur pour l'échelle déployée sur la position du CDG du système échelle-travailleur, position P3.....	77
Figure 80.	Influence du matériau de l'échelle non déployée sur la position du CDG du système échelle-travailleur, pour le travailleur T3 dans la position P3.....	78
Figure 81.	Influence du matériau de l'échelle non déployée sur la position du CDG du système échelle-travailleur pour le travailleur T1 dans la position P3.....	79
Figure 82.	Influence du poids du travailleur pour une échelle de 8 pieds, position P1 pour une échelle de 8 pieds (3 graphes supérieurs) et pour une échelle de 16 pieds (3 graphes inférieurs).....	80
Figure 83.	Influence du poids et de la taille du travailleur sur la position du CDG du système escabeau-travailleur pour l'escabeau de 12 pieds.....	81
Figure 84.	Influence du poids et de la taille du travailleur sur la position du CDG du système escabeau-travailleur pour l'escabeau de 6 pieds.....	81
Figure 85.	Influence du matériau de l'escabeau (aluminium ou fibre de verre) sur la position du CDG du système escabeau-travailleur, pour le travailleur T3.....	82
Figure 86.	Force latérale maximale pour une surface en acier, en fonction de l'angle d'installation de l'échelle et du poids du travailleur, pour une échelle de 12 pieds de haut.	84

Figure 87.	Force latérale maximale pour une surface en acier, en fonction de l'angle d'installation de l'échelle et du poids du travailleur, pour une échelle de 21 pieds de haut.	84
Figure 88.	Force latérale maximale en fonction du poids du travailleur, pour des escabeaux de 6 et 12 pieds de haut.	85
Figure 89.	Diagramme de corps libre pour le système échelle-travailleur dans le sens avant-arrière.	99
Figure 90.	Diagramme de corps libre pour le système échelle-travailleur dans le sens gauche-droite, travailleur au repos.	100
Figure 91.	Diagramme de corps libre pour le système échelle-travailleur dans le sens gauche-droite, travailleur penché sur le côté.	101
Figure 92.	Diagramme de corps libre pour le système escabeau-travailleur dans le sens avant-arrière.	102
Figure 93.	Diagramme de corps libre pour le système escabeau-travailleur dans le sens gauche-droite.	103
Figure 94.	Expérimentateur dans la position de repos avant de débiter la séquence de mouvements.	107
Figure 95.	Diagramme de corps libre du système pour le travailleur au repos.	107
Figure 96.	Expérimentateur dans la position P1.	109
Figure 97.	Diagramme de corps libre du système pour le travailleur dans la position P1.	109
Figure 98.	Expérimentateur dans la position P3.	111
Figure 99.	Expérimentateur dans la position P2.	111
Figure 100.	Diagramme de corps libre pour le travailleur au repos sur l'escabeau.	113
Figure 101.	Diagramme de corps libre pour le travailleur en position P1 sur l'escabeau.	114
Figure 102.	Diagramme de corps libre pour le travailleur en position P2 sur l'escabeau.	116
Figure 103.	Diagramme de corps libre pour le travailleur appliquant une force latérale.	117

LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS

CCQ :	Commission de la construction du Québec
CDG :	Centre de gravité
COF :	Coefficient de friction (<i>Coefficient of friction</i>)
CNESST :	Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail
CSTC :	Code de sécurité pour les travaux de construction
DCL :	Diagramme de corps libre
HSE :	<i>Health and Safety Executive</i>
IRSST :	Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail
NIOSH :	<i>National Institute for Occupational Safety and Health</i>
PTI :	Perte de temps indemnisée
RSST :	Règlement sur la santé et la sécurité du travail

1. INTRODUCTION

1.1 Chutes de hauteur et proportion reliée aux échelles et escabeaux

1.1.1 Coût des chutes de hauteur

Les chutes de hauteur (aussi appelées chutes au niveau inférieur) sont encore aujourd'hui une des principales causes d'accident au Québec, et la deuxième cause en termes de coûts sur la période 2010-2012, avec une moyenne de 397 millions de dollars par année (Duguay, Boucher, Prud'homme, Busque, et Lebeau, 2017). Sur la période 2010-2012, on compte annuellement en moyenne 4 894 chutes au niveau inférieur avec perte de temps indemnisée (PTI), soit le 7^e rang en termes de nombres de lésions avec PTI, et une durée moyenne d'arrêt de travail de 142 jours (3^e rang). Finalement, toujours sur cette période 2010-2012, le coût moyen par lésion pour les chutes de niveau inférieur est de 81 157 \$ (3^e rang), soit près du double du coût moyen pour l'ensemble des lésions (49 043 \$) (Duguay *et al.*, 2017). Ces chiffres sont à peu près stables par rapport à ceux de la période 2005-2007 qui ont été présentés dans le rapport de Duguay, Boucher, Busque, Prud'homme et Vergara (2012), et l'on peut donc retenir qu'il n'y a pas eu d'amélioration significative en termes d'élimination des chutes de hauteur au Québec.

1.1.2 Chutes des échelles et escabeaux

La situation des accidents reliés à l'utilisation des échelles et escabeaux est préoccupante. En effet, selon la lettre de demande que nous a fournie la CNESST en 2016, « les statistiques de lésions impliquant l'échelle que ce soit en construction ou en établissement montrent une augmentation des lésions au fil des ans (période de 2007 à 2012) ». Par ailleurs, 20 % des lésions en établissement et en construction dues à une chute en hauteur sont causées par une chute à partir d'une échelle (entre 2009 et 2013). Cette recherche a été conçue dans le but de répondre aux objectifs fixés dans la demande de la CNESST : « documenter davantage les balises reliées à la stabilité des échelles et des escabeaux lors de leur utilisation comme moyen d'accès ou pour réaliser un travail ». La lettre mentionne également que « L'étude devrait aussi inclure des essais en vue de développer des documents visuels qui pourraient être utilisés pour présenter clairement les limites de stabilité des échelles et escabeaux, et convaincre la clientèle des risques associés à l'utilisation de ces équipements. »

Entre 2009 et 2014, la CNESST a rédigé 14 rapports d'enquête d'accident dont 12 sont mortels impliquant l'utilisation d'une échelle. Dans 40 % des cas, elle était utilisée comme moyen d'accès et dans les autres 60 % des cas, elle était utilisée pour réaliser un travail (l'utilisation d'échelles est permise pour effectuer des travaux de moins d'une heure). Ces accidents qui ont été enquêtés mènent la CNESST au constat que les règles de sécurité de base lors de l'utilisation de ces équipements ne sont souvent pas appliquées et que la gestion déficiente des travaux ne prend pas en compte l'ensemble des risques présents.

En Australie, les chutes d'échelle sont responsables de 16 % des décès (1^{er} rang), 15 % des accidents, et 28 % des hospitalisations entre 2003 et 2011 (Safework Australia, 2013). Pour les États-Unis, les chutes d'échelle sont la première cause de décès pour les chutes de hauteur, et représentent 20 % des décès, devant les chutes depuis un toit (Bureau of Labor Statistics, 2012; Marsh et Jackson, 2013). Dans ces deux pays, comme au Québec, le travail à l'échelle est autorisé. Les échelles sont le deuxième agent causal des chutes de hauteur pour l'industrie de la

construction au niveau mondial, juste derrière les échafaudages (Nadhim, Hon, Xia, Stewart, et Fang, 2016). Et aux États-Unis, dans le cas de blessures touchant les travailleurs de la construction suite à une chute de hauteur, et impliquant un outil ou un équipement, 81 % des cas traités aux urgences impliquaient une échelle pour la période 1998-2005 (Lipscomb, Schoenfisch, Shishlov, et Myers, 2010).

Une étude rétrospective menée auprès de patients ayant visité un hôpital à la suite d'une chute d'échelle en Irlande a montré que dans la plupart des cas, la chute survenait au travail et que la hauteur de chute était comprise entre 5 et 10 pieds (O'Sullivan, Wakai, O'Sullivan, Luke, et Cusack, 2004). Une étude similaire menée aux États-Unis mentionnait une hauteur moyenne de chute de 7,5 pieds pour des chutes d'échelle au travail (Lombardi *et al.*, 2011). Finalement, 63 % des chutes d'échelle causent des fractures ou des entorses (Partridge, Virk, et Antosia, 1998).

2. OBJECTIFS DE RECHERCHE

Les chutes d'échelles peuvent être classées en deux grandes catégories : le travailleur chute de l'échelle et le travailleur chute avec l'échelle (Shepherd, Kahler, et Cross, 2006). Une chute du travailleur avec l'échelle correspond à une perte de stabilité et peut être liée au positionnement initial de l'échelle (Hsiao *et al.*, 2008; Shepherd *et al.*, 2006).

Cette étude s'intéresse au cas de la chute du travailleur avec l'échelle et vise à déterminer les limites de stabilité lors de l'utilisation d'échelles portatives et escabeaux. Les limites de stabilité seront déterminées pour :

- des positions statiques (mouvement lent pour se mettre en position puis maintien de la position);
- des cas dynamiques (mouvement assez rapide, impulsions sur l'échelle, tâches de travail, transmission de charge).

Ces limites de stabilité seront étudiées en fonction du type de surface en pied et en tête d'échelle, et pour des angles inclus dans les limites fixées par le Code de sécurité pour les travaux de construction (CSTC) (RLRQ, c. S-2.1, r. 4) : entre 70,5 ° et 75,5 °. Les essais statiques présentent un intérêt pour deux raisons : (i) ils sont plus facilement reproductibles pour l'expérimentateur (on peut donc plus facilement aller chercher une valeur moyenne qu'avec des essais dynamiques); (ii) ils serviront à valider les modèles analytiques du système échelle-travailleur, qui seront ensuite utilisés pour généraliser certaines conclusions ou étudier l'influence particulière de certains paramètres.

3. ÉTAT DES CONNAISSANCES

3.1 Critères de stabilité des échelles et escabeaux

Il y a quatre modes de perte de stabilité pour les échelles (Clift, 2004; Hsiao *et al.*, 2008) :

1. Glissement du pied (*base slip*) (Figure 1 (a));
2. Glissement (basculement) du sommet sur le côté (*top slip*) (Figure 1 (b));
3. Retournement (*flip*) (Figure 1 (c));
4. Basculement arrière (*top contact*) (Figure 1 (d)).

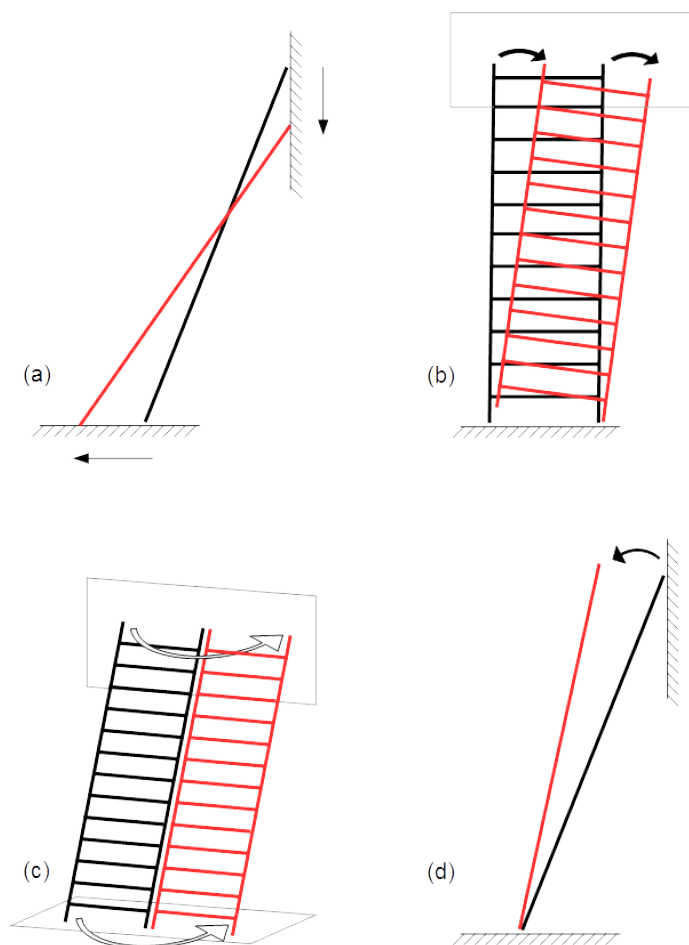


Figure 1. Modes de perte de stabilité des échelles.

(Adaptée de Clift, 2004)

En sus de ces modes de perte de stabilité, les accidents liés à l'utilisation d'échelle sont aussi dus à des personnes qui manquent un échelon ou trébuchent (Hsiao *et al.*, 2008; Pliner, Seo, Ramakrishnan, et Beschorner, 2019), ou plus rarement à une défaillance structurelle de l'échelle (Hsiao *et al.*, 2008).

Pour les escabeaux, les modes de perte de stabilité sont résumés dans la Figure 2 :

1. Basculement sur le côté (Figure 2 (a));
2. Basculement arrière (Figure 2 (b)).

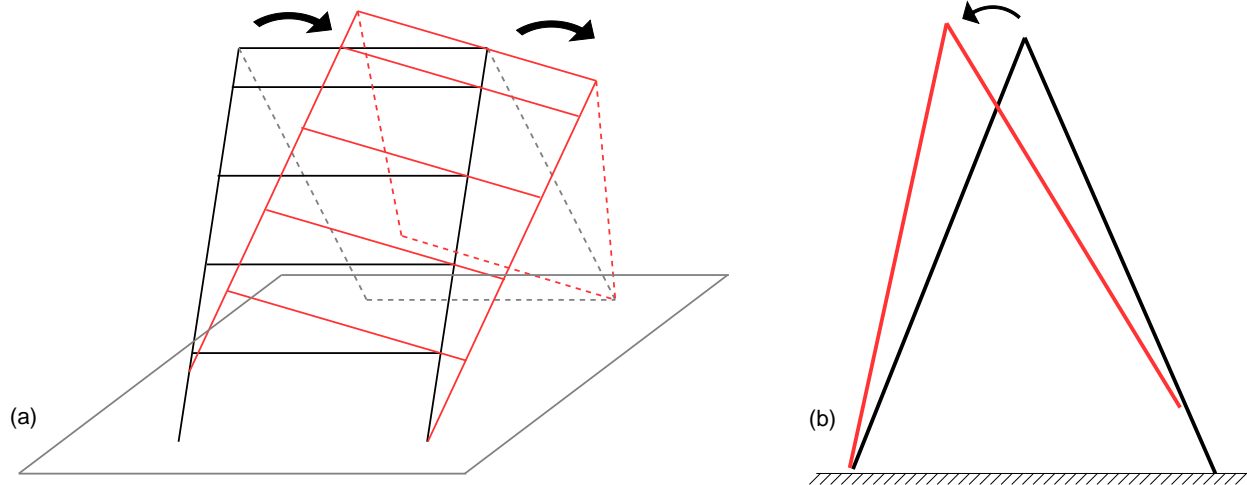


Figure 2. Modes de perte de stabilité des escabeaux.

3.1.1 Angle d'inclinaison

Un des principaux critères affectant la stabilité des échelles est l'angle d'inclinaison de celle-ci. De cet angle découle la stabilité de l'échelle pour les critères de glissement du pied (Figure 1 (a)) et du basculement en arrière (Figure 1 (d)). Selon les normes en vigueur aux États-Unis et au Canada, l'angle idéal se situe autour de 75° afin d'éviter le glissement du pied (American Ladder Institute, 2017; Association canadienne de normalisation, 2012). En effet, l'angle d'inclinaison (α) est directement relié à la demande en friction aux pieds de l'échelle : plus l'angle est grand, plus la demande en friction est faible : un angle passant de 75° à 65° augmente de 77 % la demande en friction à la base (Chang, W.-R., Chang, Matz, et Son, 2004). Mais si cet angle est trop grand, le risque de basculer en arrière devient important.

Le Code de sécurité pour les travaux de construction (RLRQ, c. S-2.1, r. 4) exige que l'échelle soit installée selon la méthode présentée à la Figure 3, ce qui équivaut à un angle α de $75,5^\circ$ pour L/4 et $70,5^\circ$ pour L/3. Ce critère est aussi présent dans le Règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST) (RLRQ, c. S-2.1, r. 13).

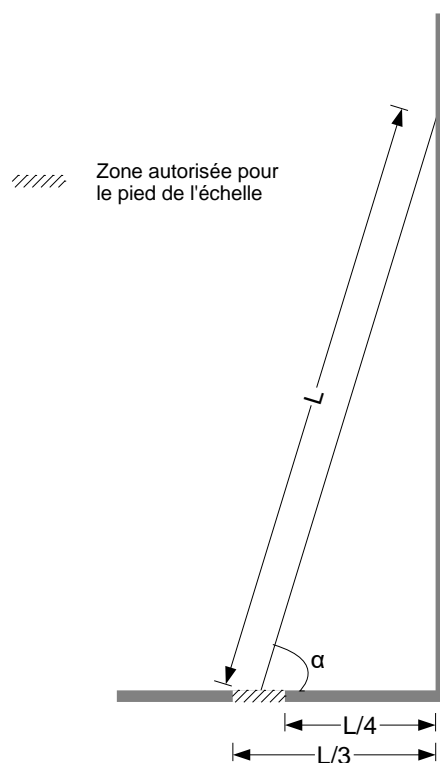


Figure 3. Mise en place d'une échelle selon le CSTC ou le RSST.

En règle générale, les travailleurs installent les échelles avec un angle inférieur à 75° en milieu de travail et éprouvent généralement un sentiment de sécurité accru avec un angle plus faible (Chang, W.-R., Huang, Chang, Brunette, et Fallentin, 2016).

Plusieurs travaux du *National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH) ont porté sur l'évaluation des méthodes de mise en place des échelles pour atteindre un angle d'inclinaison satisfaisant (Simeonov, Hsiao, Kim, Powers, et Kau, 2012; Simeonov, Hsiao, Powers, *et al.*, 2013), et ont débouché sur le développement d'une App pour iOS et Android permettant d'aider les travailleurs à positionner leur échelle à un angle de 75° (Simeonov, Hsiao, et Powers, 2013).

Bien entendu, outre l'angle d'inclinaison, la résistance au glissement est influencée par le type de surface sur laquelle est installée l'échelle, le matériau recouvrant les pieds de l'échelle, et la présence potentielle d'agents lubrifiants sur ces surfaces (Chang, W. R., Chang, et Matz, 2005).

3.1.2 Autres critères affectant la stabilité

Outre l'angle d'inclinaison, défini au moment de la mise en place de l'échelle, plusieurs autres facteurs affectent la stabilité de l'échelle comme point d'accès ou pour effectuer une tâche :

- La hauteur du travailleur sur l'échelle : plus le travailleur est haut, plus la demande en friction à la base augmente, mais plus le risque de basculement en arrière devient faible;
- La position du centre de gravité (CDG) du travailleur par rapport à l'axe de symétrie de l'échelle : si le travailleur se penche sur le côté, les réactions d'appui du système seront différentes;

- Le caractère dynamique du problème : le travailleur est rarement parfaitement statique sur une échelle, qu'elle soit utilisée comme point d'accès ou pour effectuer une tâche;
- Le type de tâche effectuée : clouage, perçage, nettoyage de drain, etc.;
- Les coefficients de friction en pied et en tête d'échelle.

Des travaux publiés par le *Health and Safety Executive* (HSE) ont examiné certains de ces critères, notamment (Clift, 2004; Clift, Harris, et Beasty, 2006) :

- Variabilité des sujets, pour un angle de mise en place fixe;
- Variabilité des tâches effectuées par les sujets : percer un trou avec une perceuse, attraper un objet sur le côté, scier une planche sur le côté, placer une charge sur le côté. Toutes ces tâches étaient effectuées à la même position verticale sur l'échelle, et à une distance horizontale fixée;
- Risques d'instabilité lors de l'utilisation d'échelle pour monter ou descendre d'une plateforme en hauteur ou d'un toit, notamment dans le cas de transport de matériaux de construction.

Lors de ces travaux, les forces étaient mesurées en pied et au sommet de l'échelle, permettant ainsi de déterminer la position du CDG global du système échelle – travailleur (Clift, 2004; Clift et al., 2006).

3.2 Exigences du CSTC

Les articles relatifs à l'utilisation d'échelles et escabeaux sont présentés dans l'encadré ci-dessous (RLRQ, c. S-2.1, r. 4).

3.5.2. Une échelle doit être :

a) conçue, construite, entretenue et utilisée de façon à ne pas compromettre la sécurité des travailleurs;

3.5.3. Échelles commerciales : L'employeur doit s'assurer que toute échelle fabriquée commercialement qu'il utilise est conforme à la norme Échelles portatives, CAN3-Z11-M81, sauf dans la mesure où cette norme est modifiée par la présente sous-section.

3.5.6. Utilisation d'une échelle : Toute échelle doit :

- a) reposer sur une base solide et prendre appui, au sommet, sur ses 2 montants;
- b) être maintenue fermement en position par une ou plusieurs personnes si elle n'est pas fixée de façon permanente et que sa longueur est égale ou supérieure à 9 m;
- c) être préservée contre tout choc ou glissement de nature à compromettre son équilibre;
- d) lorsqu'elle n'est pas fixée de façon permanente, être inclinée, conformément à l'annexe 0.1, de façon telle que la distance horizontale entre le pied de l'échelle et le plan vertical de son support supérieur soit approximativement entre le 1/4 et le 1/3 de la longueur de l'échelle entre ses supports;
- e) si elle est utilisée comme moyen d'accès :
 - i. être solidement fixée en place;
 - ii. dépasser le palier supérieur d'au moins 900 mm; et
 - iii. avoir un espace libre d'au moins 150 mm à l'arrière des échelons;

- f) être placée de façon telle qu'il y ait un espace libre suffisant à sa base;
- g) (paragraphe abrogé);
- h) ne pas être reliée à une autre, bout à bout, par enture;
- i) si elle est installée en montée verticale continue à moins qu'elle soit installée en permanence et munie d'une crinoline :
 - i. comporter des paliers de repos, munis de garde-corps à des intervalles ne dépassant pas 6 m; et
 - ii. être décentrée à chaque palier pour assurer une protection à la partie supérieure;
- j) lorsqu'en métal ou munie de renforcements métalliques, ne pas être utilisée près d'un circuit électrique à découvert;
- k) être d'une longueur suffisante pour permettre à une personne de travailler sans qu'elle ait à se placer sur les 2 derniers échelons; et
- l) être montée et descendue par l'usager de telle façon qu'il soit face à celle-ci.

3.5.7. Escabeau : Lorsque le travailleur utilise un escabeau, l'employeur doit s'assurer :

- a) qu'il est conforme à la norme Échelles portatives, CAN3-Z11-M81, sauf dans la mesure où cette norme est modifiée par la présente sous-section;
- b) qu'il n'est pas utilisé près d'un circuit électrique à découvert, s'il est en métal ou muni de renforcements métalliques;
- c) que ses montants sont écartés au maximum et que son dispositif de verrouillage est en position verrouillée; et
- d) que la plateforme et la tablette ne servent pas d'échelon.

3.9.1. Généralité : Les échafaudages construits selon la présente sous-section doivent être là où les travailleurs ne peuvent, du sol ou d'une base solide, exécuter leurs travaux en toute sécurité. Cependant, l'utilisation d'échelles est permise pour des travaux de moins d'une heure.

Selon les exigences du CSTC, on remarque donc :

- Que les échelles et escabeaux doivent être conformes à la norme CAN3-Z11-M81;
- Qu'il est permis d'utiliser une échelle pour des travaux de moins d'une heure;
- Qu'il n'y a pas de critères définissant les limites de stabilité lors de l'utilisation d'une échelle, outre l'indication concernant l'inclinaison « la distance horizontale entre le pied de l'échelle et le plan vertical de son support supérieur soit approximativement entre le 1/4 et le 1/3 de la longueur de l'échelle entre ses supports ».

Il est intéressant de remarquer également que la norme CAN3-Z11-M81 est une norme de performance, définissant les exigences de conception et de résistance des échelles, mais ne prescrivant pas de méthode d'utilisation (Association canadienne de normalisation, 2012).

On note également que la réglementation en vigueur au Québec permet l'utilisation d'échelle pour des travaux de moins d'une heure. En Ontario, la réglementation pour le secteur de la construction ne mentionne pas d'interdiction stricte du travail à l'échelle (O Reg 213/91), mais un avis publié sur le site du ministère du Travail de l'Ontario en 2011 mentionne que le travail à l'échelle ne devrait être envisagé qu'en dernier recours, lorsque le lieu de travail ne permet pas d'utiliser une plateforme (Ontario Ministry of Labour, 2011). En Colombie-Britannique, la réglementation n'interdit pas strictement le travail à l'échelle, mais l'autorise si celui-ci peut être réalisé sans risque (BC Reg. 296/97).

Aux États-Unis, la norme OSHA 1926.1053 ne mentionne pas d'interdiction du travail à l'échelle (Occupational Safety and Health Administration, 2019). En Australie, le travail à l'échelle n'est pas interdit, mais il est recommandé de se limiter aux tâches de courte durée (Worksafe Victoria, 2019). Finalement, en France, l'article R4323-63 du Code du travail limite fortement les possibilités d'utilisation d'échelle comme poste de travail (Décret n°2008-244 du 7 mars 2008 - art. (V)). On note cependant que les caractères de courte durée et de répétitivité des travaux ne sont pas définis explicitement.

Article R4323-63

Créé par Décret n°2008-244 du 7 mars 2008 - art. (V)

Il est interdit d'utiliser les échelles, escabeaux et marchepieds comme poste de travail.

Toutefois, ces équipements peuvent être utilisés en cas d'impossibilité technique de recourir à un équipement assurant la protection collective des travailleurs ou lorsque l'évaluation du risque a établi que ce risque est faible et qu'il s'agit de travaux de courte durée ne présentant pas un caractère répétitif.

3.3 Problématiques en suspens

Une revue de la littérature scientifique disponible a montré que certaines questions et variables restent en suspens, notamment :

- Limites de stabilité lorsque le travailleur se penche sur le côté ou effectue une tâche en fonction de la hauteur sur l'échelle;
- Limites de stabilité de l'échelle vis-à-vis du retournement du travailleur;
- Limites de stabilité de l'échelle en fonction du type de surface en pied et en tête, et la présence ou non de facteurs modifiant le coefficient de friction (sable, eau, etc.);
- Limite de force latérale applicable par le travailleur (pour certaines tâches comme le nettoyage de gouttières).

La recherche proposée vise notamment à répondre à certaines de ces questions, pour des échelles et des escabeaux.

4. MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre présente la méthodologie utilisée pour réaliser les essais de stabilité en laboratoire sur les échelles et les escabeaux.

4.1 Matériel d'essai et instrumentation

4.1.1 Échelles et escabeaux utilisés pour les essais

Comme cela a été souligné dans le chapitre 1, la plupart des chutes d'échelles ont des hauteurs inférieures à 3 m, en conséquence, le choix des échelles pour l'étude s'est concentré sur des modèles de taille courante, plutôt que sur les échelles les plus hautes disponibles sur le marché.

Deux échelles télescopiques commerciales de 24 pieds (7,3 m) ont été utilisées pour les essais (Figure 4).



Figure 4. Échelles utilisées pour les essais.

La première (à gauche sur la Figure 4) est en aluminium, mesure 3,81 mètres de long, 443 mm de large, possède 12 échelons (barreaux) et consiste en 2 sections indépendantes de 12 pieds qui coulissent l'une sur l'autre à l'aide d'une corde. Cette échelle est une échelle de classe 1A (usage en milieu industriel et construction, « *extra heavy duty* », charge limite : 136 kg) conforme à la norme CSA-Z11 (Association canadienne de normalisation, 2012). Les échelles coulissantes de 3,81 m sont relativement courantes, car elles permettent de couvrir une large plage de hauteurs différentes, et dans notre cas d'étudier la stabilité du système échelle-travailleur pour des hauteurs allant de 1 à 6,6 mètres environ. La deuxième échelle (à droite sur la Figure 4) présente les mêmes caractéristiques géométriques, mais est en fibre de verre, ce qui la rend appropriée aux travaux électriques, mais plus lourde (23 kg annoncé par le manufacturier,

mesuré à 238 N, contre 18,6 kg annoncé pour celle en aluminium mesuré à 190 N). Les pieds des échelles sont recouverts de caoutchouc noir, strié et relativement souple.

Pour la stabilité des escabeaux, deux modes de perte de stabilité ont été étudiés, à savoir le ou basculement sur le côté ainsi que le basculement arrière (Figure 2).

Les escabeaux ne peuvent pas être ajustés en hauteur, donc, si l'on souhaite étudier la stabilité d'un escabeau à différentes hauteurs, il est nécessaire de considérer plusieurs escabeaux (un escabeau de 3 m de hauteur ne sera pas utilisable dans un immeuble de bureaux par exemple, et son embase aura une largeur plus importante qu'un escabeau de 2 m de hauteur). Deux escabeaux à chevalet (les modèles les plus courants) ont été testés (Figure 5) et leurs caractéristiques sont présentées au Tableau 1.



Figure 5. Escabeaux utilisés pour les essais.

Tableau 1. Caractéristiques des escabeaux testés

Nom de code	Taille nominale	Poids	Largeur base	Longueur base	Hauteur ouvert	Nb échelons utilisables
ESC12	12 pieds (3,6 m)	17,2 kg (198 N mesuré)	809 mm	1975 mm	3478 mm	10
ESC6	6 pieds (1,8 m)	7,2 kg (80 N mesuré)	547 mm	1086 mm	1727 mm	4

Ces escabeaux à chevalet de classe 1A (usage en milieu industriel et construction, « *extra heavy duty* », charge limite : 300 lb soit 136 kg) sont conformes à la norme CSA-Z11 (Association canadienne de normalisation, 2012). Les pieds des escabeaux sont recouverts de caoutchouc noir, strié et relativement souple.

4.1.2 Expérimentateurs

Pour cette étude, deux expérimentateurs hommes, employés de Nouvelle Hauteur et formateurs en protection contre les chutes de hauteur ont participé à la réalisation des essais. Le recours à deux expérimentateurs a été nécessaire pour éviter la fatigue lors de la réalisation des essais, car le rythme était assez soutenu : plus de 300 essais réalisés en 3 jours. Leurs caractéristiques physiques sont présentées au Tableau 2.

Tableau 2. Caractéristiques physiques des expérimentateurs

Expérimentateur	E1	E2	E2+WV
Poids	922 N	730 N	955 N
Masse	94 kg	74 kg	97 kg
Taille	182 cm	175 cm	175 cm

Leur poids et leur taille en font des sujets intéressants pour plusieurs raisons. Avec un poids proche de 100 kg pour l'expérimentateur 1 (E1), un des expérimentateurs est plutôt dans la moyenne haute de la population, alors que l'expérimentateur 2 (E2) a un poids moyen, représentant les travailleurs plus légers. E2 est un peu plus petit, et son poids a été augmenté avec l'utilisation d'une veste lestée et l'ajout de mousquetons à sa ceinture pour représenter des travailleurs un peu plus lourds et portant une ceinture d'outil assez chargée (E2+WV).

Dans les deux cas, leur métier requiert une bonne forme physique, et ils rentrent donc *a priori* dans la catégorie des mésomorphes, soit le somatotype moyen. Des endomorphes auraient très probablement eu un CDG plus bas, quant à des ectomorphes, leur CDG serait probablement plus haut, mais avec une masse plus faible. Les variations de poids et de taille ont été étudiées dans le cas de la stabilité statique par calcul, en faisant varier la masse et la hauteur du CDG.

Enfin, les expérimentateurs sont tous deux formateurs en protection contre les chutes de hauteur. Ils sont donc à même d'assurer leur sécurité avec l'équipement adéquat pour la réalisation de la totalité des essais, et ce, quelle que soit leur hauteur sur l'échelle ou l'escabeau. Cet aspect était particulièrement important d'un point de vue éthique pour la réalisation de ces essais de stabilité.

Les expérimentateurs sont exclusivement des hommes, cependant, le CDG se trouve légèrement plus bas chez les femmes que chez les hommes : environ 55 % de la hauteur pour les femmes, contre 57 % de la hauteur pour les hommes (McGinnis, 2013). Par ailleurs, les hommes sont en général un peu plus grands que les femmes, et donc leur CDG sera plus haut pour cette raison. En conséquence, les limites de stabilité sont plus vite atteintes pour les hommes, qui présentent d'une part un CDG plus haut, et d'autre part, un poids généralement plus élevé. Enfin, il faut souligner que dans le milieu de la construction les hommes représentent la majorité des travailleurs : selon la Commission de la Construction du Québec (2019) en 2018, on dénombrait 2,1 % de femmes actives sur les chantiers de construction au Québec (Commission de la construction du Québec, 2019). Ainsi, l'absence d'expérimentateur de sexe féminin ne limite que partiellement les conclusions de l'étude.

4.1.3 Instrumentation pour les échelles

L'instrumentation qui a été utilisée pour les essais sur les échelles est listée ci-dessous, et présentée en Figure 6 :

- Pied gauche échelle : mesure des forces R_{1X} et R_{1Z} ;
- Pied droit échelle : mesure de la force R_{2X} et R_{2Z} ;
- Point d'appui gauche en haut de l'échelle : mesure de la force R_{3X} et R_{3Y} ;
- Point d'appui droit en haut de l'échelle : mesure de la force R_{4X} et R_{4Y} .

Le choix des forces à mesurer a été fait sur la base de l'étude de Clift (2004). Dans cette étude réalisée pour le HSE, l'auteur a montré, comme dans une étude précédente, que les forces R_{1Y} , R_{2Y} , R_{3Z} et R_{4Z} sont négligeables, et qu'il n'est donc pas nécessaire de les mesurer pour arriver à des résultats probants.

Les forces sont mesurées par des plateformes de force carrées de 400 mm de côté (Figure 7 et Figure 8). Les forces R_{1X} , R_{2X} , R_{3Y} et R_{4Y} sont mesurées avec des capteurs Vishay 1042, d'une capacité de 20 kg (environ 200 N). Les autres forces sont mesurées à l'aide de capteurs Vishay 1242 d'une capacité de 100 kg (environ 1000 N). Le fabricant certifie ses capteurs jusqu'à 150 % de la capacité indiquée. Ces capteurs ont une précision de $\pm 0,02$ %, et une erreur d'excentricité de la charge inférieure à 0,0049 % de la valeur de la charge par cm d'excentricité dans le cas du modèle 1242, et 0,0042 % de la valeur de la charge par cm d'excentricité dans le cas du modèle 1042. Concrètement, cela signifie que pour une charge de 1000 N, excentrée au maximum sur la plateforme de force (20 cm d'excentricité par rapport au capteur), l'erreur de mesure sera inférieure à 0,98 N (0,0049 % x 20 cm x 1000 N). Ainsi, ce type de capteur offre à la fois une bonne précision et une flexibilité pour positionner les pieds des échelles, ou les laisser se déplacer librement. L'acquisition des données est faite à l'aide d'un boîtier d'acquisition System 8000 de Micro-measurement à 8 canaux, avec une précision de $\pm 0,05$ %. L'étalonnage du système a été fait en décembre 2018 soit environ 8 mois avant les essais.

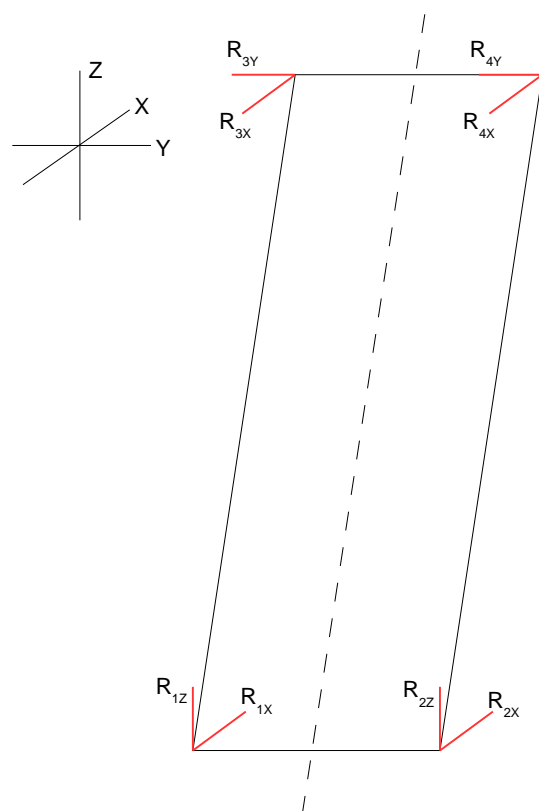


Figure 6. Position des cellules de charge pour mesurer les forces sur l'échelle.

Les données ont été enregistrées en temps réel pour les 8 canaux, à une fréquence d'échantillonnage de 100 Hz. Outre l'enregistrement des forces, deux caméras ont été utilisées pour filmer les essais de deux points de vue différents.

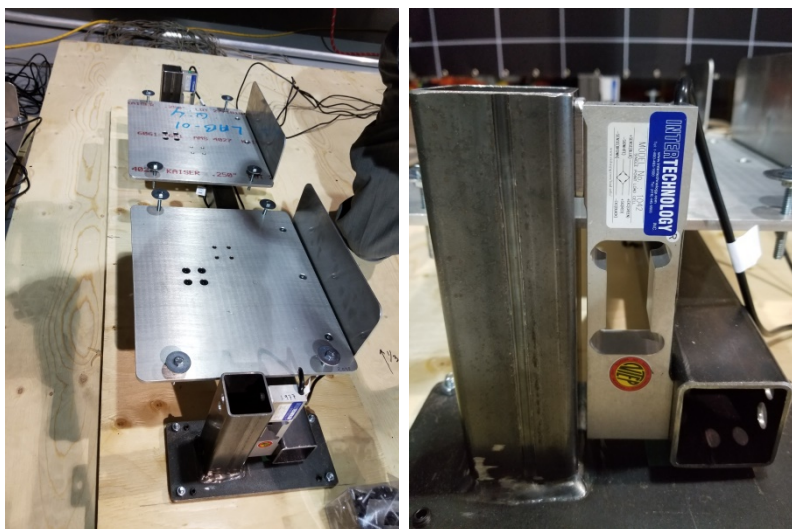


Figure 7. Dispositif de mesure avec plateformes de force.

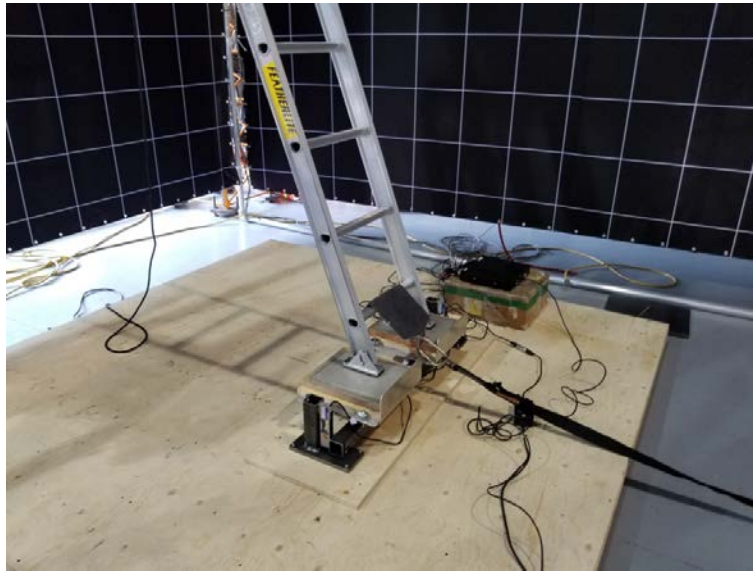


Figure 8. Dispositif de mesure des forces en pied d'échelle avec la surface en béton lisse (sangle pour les essais préliminaires de mesure de friction).

4.1.4 Surfaces d'appui pour les pieds et le sommet de l'échelle

La Figure 9 présente les différentes surfaces d'appui au sommet de l'échelle ou pour appui sur les montants. La plaque en bois équipée du coin en acier (Figure 9 (a)) a également été utilisée pour les essais sur un coin en aluminium en changeant la cornière, ainsi que pour les essais sur le coin en bois, en retirant simplement la cornière. Les surfaces d'appui en acier et en brique de béton vont être plus fréquemment rencontrées en milieu industriel et commercial, alors que le bois et le gypse vont être plus courants dans les milieux résidentiels ou sur les chantiers de construction.

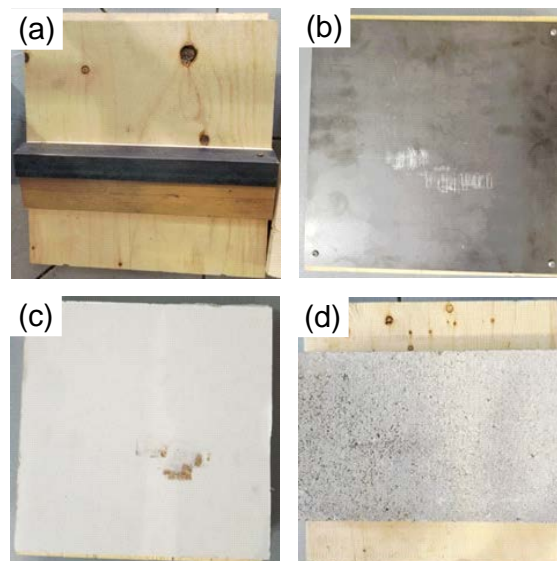


Figure 9. Surfaces d'appui au sommet de l'échelle : (a) coin en acier, (b) acier, (c) gypse et (d) brique de béton.

La Figure 10 présente les surfaces d'appui en pied de l'échelle, soit le béton lisse et le carrelage. Le béton a été laissé à l'état brut, sans être poli ou vernis. Ce type de surface d'appui va essentiellement être rencontré en milieu industriel et commercial. Le carrelage est du carrelage résidentiel classique qui peut être fréquemment rencontré en milieu résidentiel et commercial.

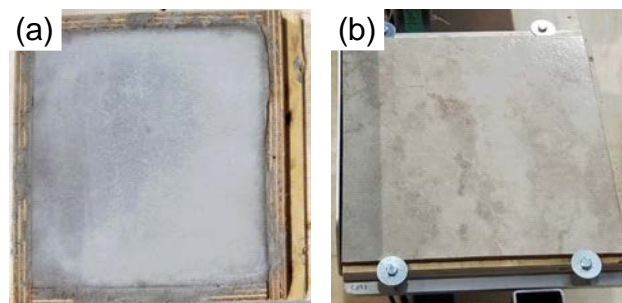


Figure 10. Surfaces d'appuis en pied d'échelle : (a) béton lisse et (b) carrelage.

4.1.5 Instrumentation pour les escabeaux

Pour les essais sur les escabeaux, la force en Z est mesurée à chaque pied de l'escabeau (Figure 11). Les données sont enregistrées en temps réel à une fréquence d'échantillonnage de 100 Hz. Outre l'enregistrement des forces, deux caméras ont été utilisées pour filmer les essais de deux points de vue différents.

Les forces sont mesurées par des plateformes de force carrées de 400 mm de côté à l'aide de capteurs Vishay 1242 d'une capacité de 100 kg (environ 1000 N). La précision de ce type de capteur est discutée en section 4.1.3. Ce type de capteur offre à la fois une bonne précision et une flexibilité pour positionner les pieds des escabeaux, ou les laisser se déplacer librement.

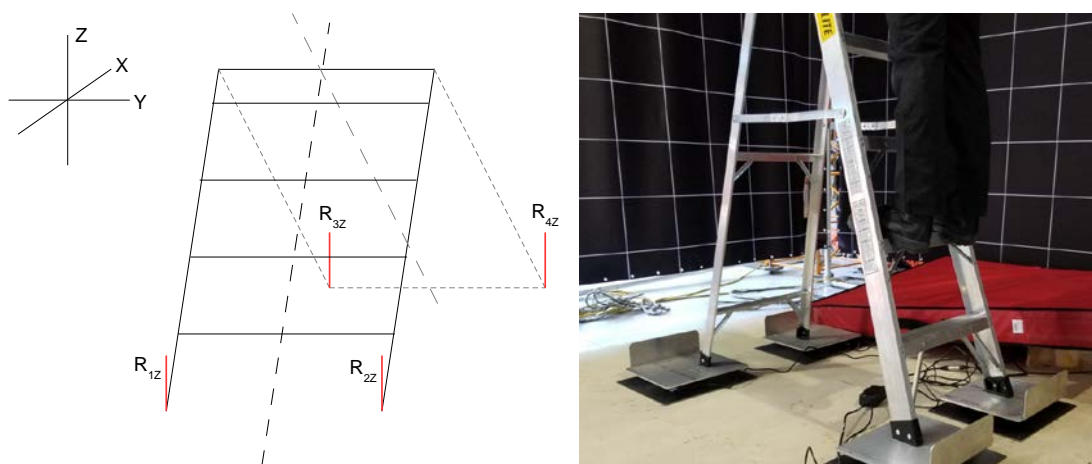


Figure 11. Position des plateformes de force pour mesurer les forces en pied de l'escabeau.

4.1.6 Laboratoire d'essais

La Figure 12 présente le laboratoire d'essai avec les plateformes de forces installées en pied et au sommet de différentes échelles. Un plancher en 2 po x 4 po et contreplaqué a été installé au sol afin de pouvoir ajuster rapidement la position des plateformes de force en pied d'échelle. Afin de pouvoir ajuster également la hauteur des plateformes de force, une structure en 2 po x 4 po et contreplaqué a été érigée et installée sur la structure métallique présente au laboratoire. Finalement, des toiles de 15 pi x 15 pi, avec un quadrillage régulier de dimensions 1 pi x 1 pi ont été installées sur des châssis métalliques afin d'offrir un fond uniforme pour les photos et vidéos d'une part, mais également pour permettre d'estimer l'amplitude des mouvements et changements de position des expérimentateurs.



Figure 12. Installation des échelles dans le laboratoire d'essais.

4.2 Stabilité des échelles

Pour la stabilité des échelles, les quatre modes de perte de stabilité présentés en Figure 1 sont étudiés.

4.2.1 Configurations d'essai et séquence de mouvements

Selon le Règlement sur la santé et la sécurité au travail, article 26(4), l'inclinaison d'une échelle non fixée doit être comprise entre le quart et le tiers de la longueur de l'échelle soit $L/3$ et $L/4$ (Figure 3). Les essais de stabilité ont été faits pour les deux angles d'inclinaison indiqués au Tableau 3. L'angle de l'échelle a été mesuré à l'aide d'un niveau électronique et une précision de l'ordre de $0,5^\circ$ est tolérée compte tenu des petits déplacements pouvant survenir au pied ou au sommet de l'échelle lors des mouvements de l'expérimentateur.

Tableau 3. Mise en place de l'échelle

Paramètre de mise en place	Angle d'inclinaison correspondant
$L/3$	$70,5^\circ$
$L/4$	$75,5^\circ$

La stabilité de l'échelle a été étudiée pour 3 positions du travailleur (Tableau 4), et pour différentes hauteurs de l'expérimentateur sur l'échelle : en fonction de l'échelon de l'échelle sur lequel les pieds de l'expérimentateur reposent.

Tableau 4. Positions de l'expérimentateur pour la vérification de la stabilité de l'échelle

Vérification de stabilité	Positions/mouvements
Glissement du pied	Position de départ (haut de l'échelle)
Basculement arrière	Positions 1 et 3 (Figure 14 et Figure 16)
Glissement du sommet et retournement	Position 2 (Figure 15)

La séquence de mouvements contrôlés réalisés par les deux expérimentateurs est la suivante :

1. Position de départ : debout, droit, au repos (Figure 13);
2. Position 1 (P1) : reculé, bras tendus (Figure 14);
3. Position 2 (P2) : penché sur le côté, main sur l'échelon de l'échelle (Figure 15);
4. Position 3 (P3) : retourné en se tenant avec une seule main, bras tendu si possible, comme pour attraper un outil tendu par un travailleur au sol (Figure 16).

La séquence de mouvements était toujours réalisée dans le même ordre, avec un maintien de 1 à 2 secondes pour chacune des 3 positions¹. Chaque essai incluant la séquence de mouvements complète avait une durée de l'ordre de 15 à 20 secondes. Pour la position 2, l'effet de la position de la main sur l'échelle a été étudié : sur l'échelon ou sur le montant de l'échelle. Pour la position 1, les épaules sont situées environ 2 pieds (0,6 m) en arrière de la position de départ. Pour la position 2, le sternum sort de la zone située entre les montants de l'échelle, et le bras tendu atteint environ 4 pieds (1,2 m) plus loin que le montant de l'échelle. Finalement, pour la position 3, le bras tendu atteint environ 4 pieds (1,2 m) en arrière de la position de départ.

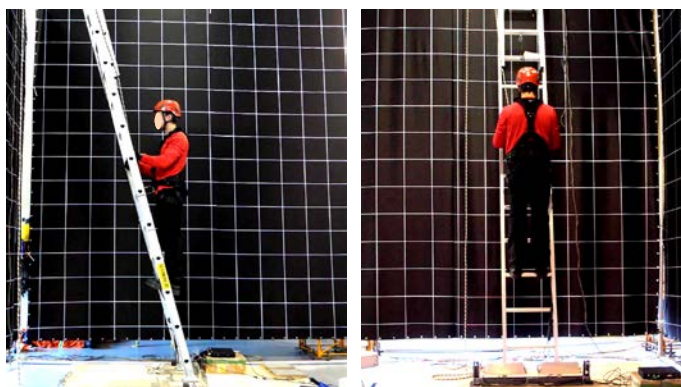


Figure 13. Vérification de la stabilité de l'échelle - Position de départ.

¹ Dans ces photos l'expérimentateur utilise l'anneau ventral de son harnais et du matériel d'escalade (poulie à friction accrochée à la structure du bâtiment), pour se protéger contre les chutes de hauteur. En cas de perte de stabilité de l'échelle, il n'y a donc pas de chute libre, il est retenu par la corde, et n'est de ce fait pas non plus équipé d'un absorbeur d'énergie. Pour un travailleur sur un chantier ou en établissement, ce type de système ne serait pas disponible et le recours à une corde d'assurance verticale, et une longe avec absorbeur d'énergie serait nécessaire. Dans un tel cas, il faudrait donc utiliser l'anneau sternal et non l'anneau ventral, car ce dernier n'est pas prévu pour faire de l'arrêt de chute, au sens traditionnel du terme.

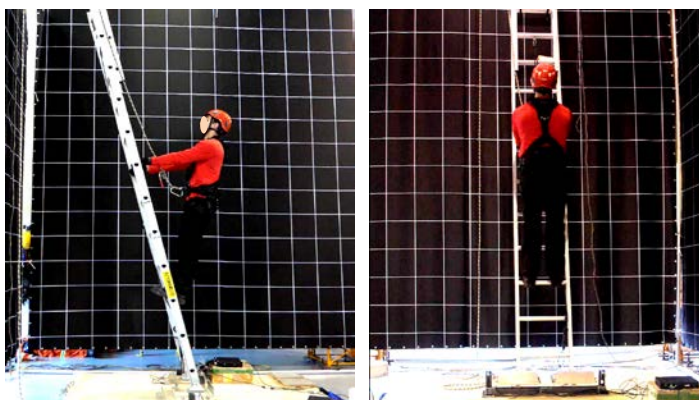


Figure 14. Vérification de la stabilité de l'échelle - Position 1 : reculé (P1).

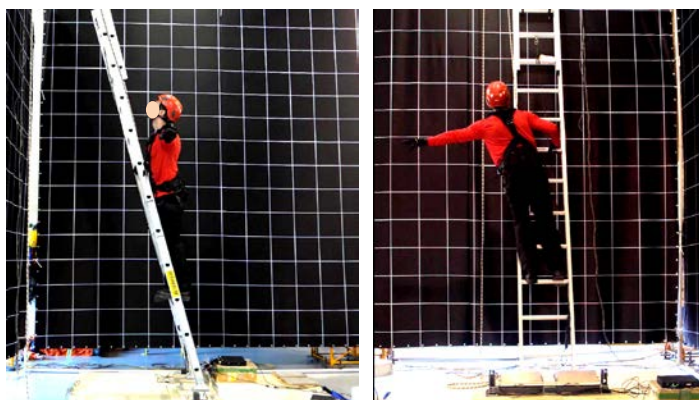


Figure 15. Vérification de la stabilité de l'échelle - Position 2 : côté (P2).

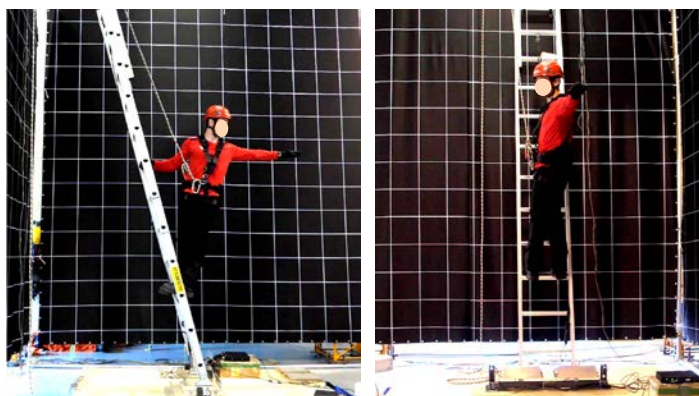


Figure 16. Vérification de la stabilité de l'échelle - Position 3 : retourné (P3).

Enfin, des cas de charge statique et dynamique ont été étudiés. Le cas statique est représenté par un expérimentateur immobile (ou quasi immobile) sur l'échelle (une fois arrivé dans l'une des positions présentées aux Figures 14 à 16), tandis que le cas dynamique est représenté par un travailleur effectuant des mouvements contrôlés (lors du passage d'une position à l'autre), ou en générant des impulsions avec les jambes sur l'échelle ou en réalisant des tâches de travail.

L'étude du HSE (Clift, 2004) a étudié l'influence de différentes tâches de travail (utilisation d'une perceuse, monter une charge, descendre une charge, attraper un objet, etc.). Trois tâches ont été identifiées comme particulièrement compliquées par les participants de cette étude : monter une charge (non conforme avec la méthode des trois points appuis), attraper/descendre une charge et scier une planche. Les autres tâches n'ont pas été perçues comme particulièrement compliquées ni mené souvent à des cas d'instabilité. Une des limites de l'étude du HSE est notamment le fait qu'une seule échelle ait été utilisée, et que les positions de travail/tâches aient été effectuées seulement sur le même échelon (au sommet). L'influence des surfaces d'appui n'a pas été étudiée précisément. Quelques essais avec manipulation et transmission de charge lourde ont été réalisés dans notre étude.

Les positions qui ont été étudiées dans cette activité de recherche couvrent notamment les cas où le travailleur déporte son CDG de l'axe de symétrie de l'échelle (cas des tâches attraper une charge, ou effectuer une opération de vissage). Le calcul de la position du CDG du système échelle-expérimentateur permettra donc d'identifier s'il y a ou non un risque d'instabilité pour ces positions, et quelle est la marge de sécurité correspondante.

4.2.2 Essais préliminaires sur différentes surfaces

Afin d'identifier les surfaces critiques, une série d'essais préliminaires considérant différentes surfaces d'appui en pied et en tête de l'échelle a été effectuée. Les surfaces d'appui ont été choisies en fonction des conditions pouvant survenir, soit sur des chantiers de construction, soit dans des environnements industriels, ou des bâtiments commerciaux/résidentiels. Ainsi les matériaux considérés en pied d'échelle sont soit le béton lisse, soit le carrelage. L'asphalte n'a pas été considéré, car il offre un coefficient de friction plus élevé que du béton (pour un contact avec un pied d'échelle en caoutchouc). Les matériaux considérés au sommet de l'échelle sont : le bois (cas d'un chantier de construction domiciliaire), l'acier ou l'aluminium (étagère métallique dans un entrepôt), la brique en béton (appui sur un mur ou une façade d'un bâtiment), gyproc (appui sur une cloison dans un bâtiment).

Pour ces essais, les risques étudiés correspondent au glissement de l'échelle soit en pied (Figure 1 (a)), soit en tête (Figure 1 (b)).

Pour chaque configuration (Tableau 5), 3 essais (répétitions) statiques et dynamiques sont prévus, avec les paramètres suivants :

- angle de 70 ° (maximise la force horizontale);
- expérimentateur le plus lourd (E1), et positionné au plus haut sur l'échelle déployée : échelon 16 (maximise la force horizontale);
- matériaux utilisés : propres et secs, seulement quelques essais sur surface mouillée en pied;
- échelle appuyée en son sommet ou sur les montants (Figure 17);

- d'abord vérification de la stabilité vis-à-vis du glissement au pied;
- ensuite vérification de la stabilité vis-à-vis du glissement au sommet (simulation de récupération d'objet sur le côté, position 2).

Tableau 5. Configurations d'essais pour identifier les conditions critiques d'appui

Matériau au pied	Matériau au sommet	Appui de l'échelle
Béton lisse	Bois	Sommet échelle
Béton lisse	Bois	Montants
Béton lisse	Acier	Sommet échelle
Béton lisse	Alu	Montants
Béton lisse	Brique	Sommet échelle
Béton lisse	Gypse	Sommet échelle
Béton lisse mouillé	Acier	Sommet échelle
Carrelage	Acier	Sommet échelle
Carrelage	Alu	Montants
Carrelage	Acier	Montants
Carrelage	Gypse	Sommet échelle
Carrelage mouillé	Acier	Sommet échelle

Un total de 36 essais préliminaires a donc été effectué (12 configurations x 3 essais). La configuration donnant la moins bonne stabilité a été conservée pour la suite du protocole d'essai, afin d'identifier les bornes limites de stabilité des échelles : carrelage en pied d'échelle et acier au sommet de l'échelle. Le cas du carrelage mouillé a été étudié bien qu'une échelle ne devrait pas être utilisée sur une surface mouillée. Outre la séquence de mouvements décrite en section 4.2.1, l'expérimentateur donnait trois impulsions successives avec ses jambes afin de générer des forces horizontales importantes en pied d'échelle et vérifier s'il y avait un glissement du pied.



Figure 17. Échelle appuyée en son sommet (à gauche) ou sur les montants (à droite).

En supplément des essais de stabilité avec la séquence de mouvements présentée en section 4.2.1, des essais pour estimer le coefficient de friction en pied et en tête d'échelle ont été effectués pour chacune des surfaces d'appui (Figure 18). Une force horizontale était appliquée progressivement au pied ou au sommet de l'échelle, jusqu'à observer un glissement.



Figure 18. Application d'une force horizontale au bas de l'échelle pour déterminer le coefficient de friction.

4.2.3 Matrice des essais pour l'échelle non déployée

Le Tableau 6 présente la matrice des essais réalisés sur les échelles non déployées. Pour chaque configuration, 3 essais (répétitions) ont été réalisés. Les essais ont été réalisés pour partie avec E1 (54 essais) et pour le reste avec E2 (63 essais avec son poids normal et 21 essais avec port d'une veste lestée et de mousquetons, pour représenter un travailleur plus lourd, mais de même taille). Les essais identifiés E2 – FB correspondent aux essais réalisés avec E2 et l'échelle en fibre de verre.

Tableau 6. Matrice des essais pour l'échelle non déployée

Angle	Échelon	Nombre d'essais			
		E1	E2	E2+WV	E2 - FB
70 °	2	3	-	-	-
	3	3 ¹	-	-	-
	4	3 ¹	-	-	-
	5	3 ¹	-	-	-
	6	3	-	-	-
	7	3	-	-	-
	8	3	-	-	-
72,5 °	2	3	3	-	-
	3	3	3	-	-
	4	3	3	-	-
	5	3	3	-	-
	6	-	3	-	-
	7	-	3	-	-
	8	-	3	-	-
75 °	2	3	3	3	3
	3	3	3	3	3
	4	3	3	3	3
	5	3	3	3	3
	6	3	3	3	3
	7	3 ^{1,2}	3	3	3
	8	3	3	3	3

¹ Un essai supplémentaire avec transmission de poids de 25 lb sur le côté

² Un essai supplémentaire avec installation de 5 vis à l'aide d'une visseuse électrique

Outre ces 138 essais complets par configuration, 4 essais avec transmission d'un poids de 25 lb (identifiés avec un ¹ dans le Tableau 6, voir également la section 5.2.2.5) et 1 essai de vissage (identifié avec un ² dans le Tableau 6, voir également la section 5.2.2.6) ont été faits, ainsi que des essais de montée et descente de l'échelle, avec différentes techniques.

4.2.4 Matrice des essais pour l'échelle déployée

Le Tableau 7 présente la matrice d'essais pour l'échelle déployée, pour un total de 94 essais. Pour la plupart des configurations, 3 essais (répétitions) ont été réalisés. Considérant le peu d'informations apportées par la répétition d'essais sur l'ensemble des échelons au-delà d'une certaine hauteur (instabilité plus importante pour la partie basse de l'échelle), peu d'essais ont été réalisés pour les échelons 7 à 9, 11, 12, 14 et 15. Pour l'échelle installée avec un angle de 70 °, les essais sur l'échelon 6 n'ont pas été réalisés, car cette configuration offre une meilleure stabilité vis-à-vis des modes d'instabilité de type retournement ou basculement arrière. Les essais sur l'échelle déployée ont été réalisés avec E2 essentiellement pour des raisons de disponibilité. Néanmoins, un bon nombre d'essais ont été réalisés avec cet expérimentateur équipé d'une veste lestée et de mousquetons afin de représenter un travailleur plus lourd, mais de taille similaire. Le nombre d'essais avec E2+WV a cependant été conservé plus faible pour des raisons de temps et de fatigue de l'expérimentateur. Les essais identifiés avec le suffixe – FB correspondent aux essais réalisés avec l'échelle en fibre de verre.

Tableau 7. Matrice des essais pour l'échelle déployée

Angle	Échelon	Nombre d'essais				
		E1	E2	E2+WV	E2 - FB	E2+WV - FB
70 °	2	1	3	1	-	-
	3	-	3	1	-	-
	4	-	3	1	-	-
	5	-	3	1	-	-
	10	-	3	-	-	-
	13	-	3	-	-	-
	16	-	3	-	-	-
75 °	2	-	3	1	3	1
	3	-	3	1	3	1
	4	-	3	1	3	1
	5	-	3	1	3	1
	6	-	3	1	3	-
	7	-	1	-	-	-
	8	-	1	-	-	-
	9	-	1	-	-	-
	10	-	3	1	3	-
	11	-	1	-	-	-
	12	-	1	-	-	-
	13	-	3	1	3	-
	14	-	1	-	-	-
	15	-	1	-	-	-
16	-	3	1	3	1	

4.3 Stabilité des escabeaux

4.3.1 Configurations d'essai et séquence de mouvements

La stabilité des escabeaux a été vérifiée pour les trois positions (Tableau 8) présentées aux Figures 19 à 22, et pour différentes hauteurs de l'expérimentateur sur l'escabeau : en fonction l'échelon de l'escabeau sur lequel les pieds de l'expérimentateur reposent.

Tableau 8. Positions de l'expérimentateur pour la vérification de la stabilité de l'escabeau

Vérification de stabilité	Positions/mouvements
Glissement du pied	N/A pour les escabeaux
Basculement arrière (Figure 2 b)	Positions 1 et 3 (Figure 20 et Figure 22)
Basculement sur le côté (Figure 2 a)	Position 2 (Figure 21)

La séquence de mouvements contrôlés réalisés par les deux expérimentateurs est la suivante :

5. Position de départ : debout, droit, au repos (Figure 19);
6. Position 1 (P1) : reculé, bras tendus (Figure 20);
7. Position 2 (P2) : penché sur le côté, main sur l'échelon de l'escabeau (Figure 21);
8. Position 3 (P3) : retourné en se tenant avec une seule main, bras tendu si possible, comme pour attraper un outil tendu par un travailleur au sol (Figure 22).

La séquence de mouvements était toujours réalisée dans le même ordre, avec un maintien de 1 à 2 secondes pour chacune des 3 positions. Chaque essai incluant la séquence de mouvements complète avait une durée de l'ordre de 15 à 20 secondes. Pour la position 2, l'effet de la position de la main sur l'échelle a été étudié : sur l'échelon ou sur le montant de l'escabeau. Pour la position 1, les épaules sont situées environ 2 pieds (0,6 m) en arrière de la position de départ. Pour la position 2, le sternum sort de la zone située entre les montants de l'échelle, et le bras tendu atteint environ 4 pieds (1,2 m) plus loin que le montant de l'échelle. Finalement, pour la position 3, le bras tendu atteint environ 4 pieds (1,2 m) en arrière de la position de départ.



Figure 19. Vérification de la stabilité de l'escabeau - Position de départ.

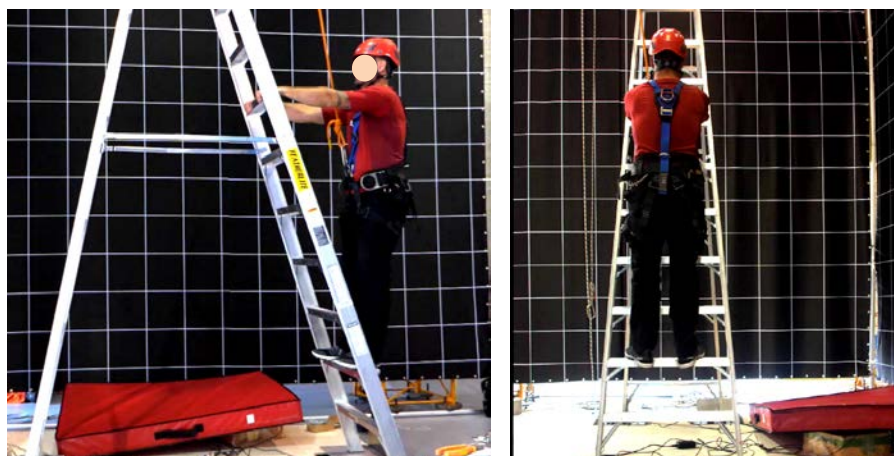


Figure 20. Vérification de la stabilité de l'escabeau - Position 1 : reculé (P1).



Figure 21. Vérification de la stabilité de l'escabeau - Position 2 : côté (P2).

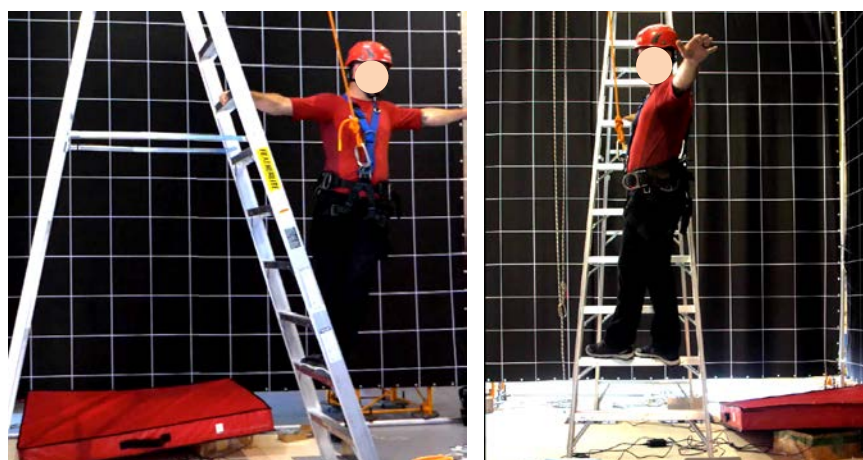


Figure 22. Vérification de la stabilité de l'escabeau - Position 3 : retourné (P3).

4.3.2 Matrice des essais sur les escabeaux

Le Tableau 9 présente la matrice d'essais pour les escabeaux de 12 pieds (ESC12) et 6 pieds (ESC6). Il y a 27 essais pour l'escabeau de 12 pieds, et tous ont été réalisés avec E1. En effet, il est anticipé que cet escabeau sera plus stable que celui de 6 pieds, ainsi toutes les positions stables avec l'expérimentateur le plus lourd le seront aussi pour les travailleurs plus légers. Il y a 12 essais pour l'escabeau de 6 pieds, tous réalisés avec E2. En effet, des instabilités fortes sont anticipées avec cet escabeau. Ainsi, une instabilité avec le plus léger des deux expérimentateurs entraînera nécessairement une instabilité avec un travailleur de poids égal ou supérieur.

Tableau 9. Matrice des essais pour les escabeaux

Échelon	Nombre d'essais	
	E1 - ESC12	E2- ESC6
1	3	3
2	3	3
3	3	3
4	3	3
5	3	-
6	3	-
7	3	-
8	3	-
9	3	-

5. RÉSULTATS D'ESSAIS

5.1 Essais préliminaires sur les échelles : surfaces d'appui en pied et au sommet

Cette section présente les essais préliminaires réalisés sur une échelle déployée en aluminium, installée à un angle de 70° et en faisant varier les surfaces d'appui en pied et au sommet de l'échelle. Dans un premier temps, les coefficients de friction (COF) mesurés lors d'essais visant spécifiquement à les estimer sont présentés. Puis, les résultats des essais de stabilité avec différentes surfaces sont discutés.

5.1.1 Estimation des coefficients de friction

La Figure 23 présente les coefficients de friction mesurés sur différentes surfaces lorsque l'échelle est appuyée en son sommet. Ces courbes ont des allures relativement classiques, avec une augmentation de la demande en friction tout d'abord, puis un pic (COF statique) et ensuite une diminution de la demande (COF dynamique). Le pic dont la valeur est indiquée sur la Figure 23 correspond au coefficient de friction statique qu'il est nécessaire de dépasser pour débuter un mouvement. Pour l'acier, les coefficients de friction statique et dynamique semblent être du même ordre de grandeur. Pour le bois, l'irrégularité du matériau entraîne des mouvements saccadés ce qui génère les différents pics visibles dans la figure.

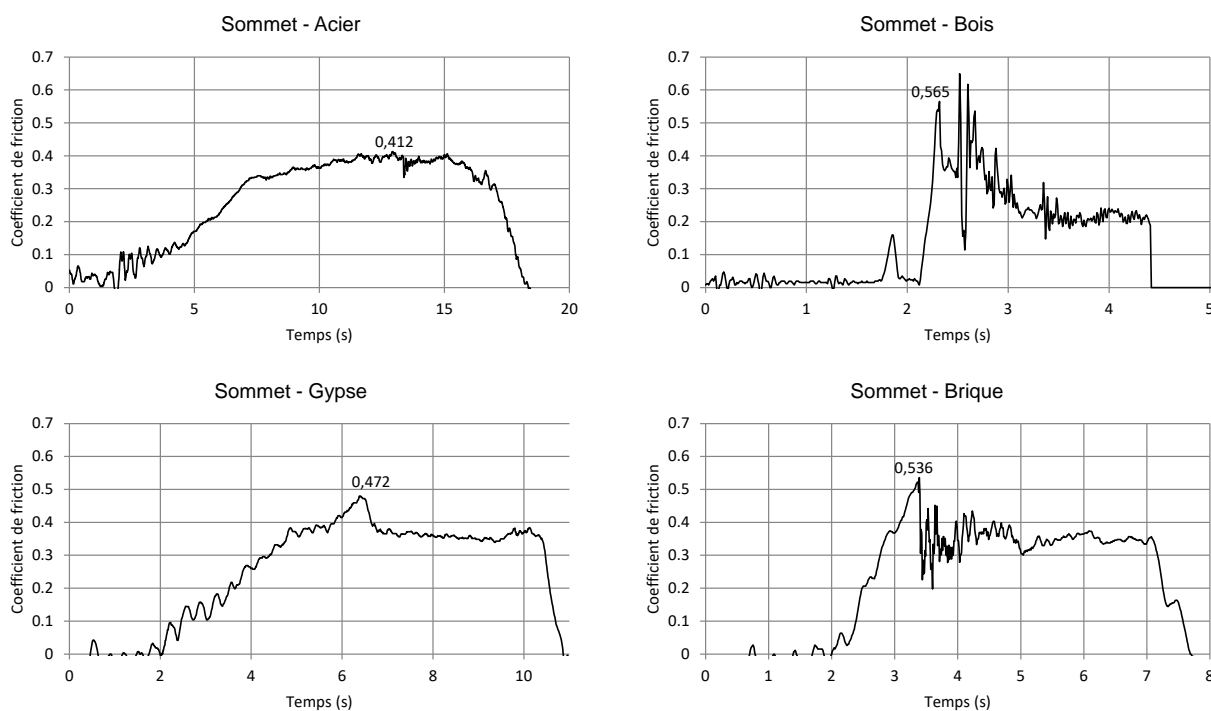


Figure 23. Coefficient de friction calculé au sommet de l'échelle en fonction de la surface d'appui.

La Figure 24 présente les coefficients de friction mesurés sur différentes surfaces lorsque l'échelle est appuyée sur ses montants. Les coefficients de friction sont élevés pour le bois et l'aluminium. Ceci s'explique par le fait que l'aluminium des montants de l'échelle (strié) s'enfonce dans ces deux matériaux, ce qui génère des forces de friction latérale élevées. Enfin, pour l'acier, matériau plus rigide que l'aluminium, le coefficient de friction mesuré lorsque l'échelle est appuyée sur ses montants est du même ordre de grandeur que celui mesuré lorsque l'échelle est appuyée en son sommet (Figure 23).

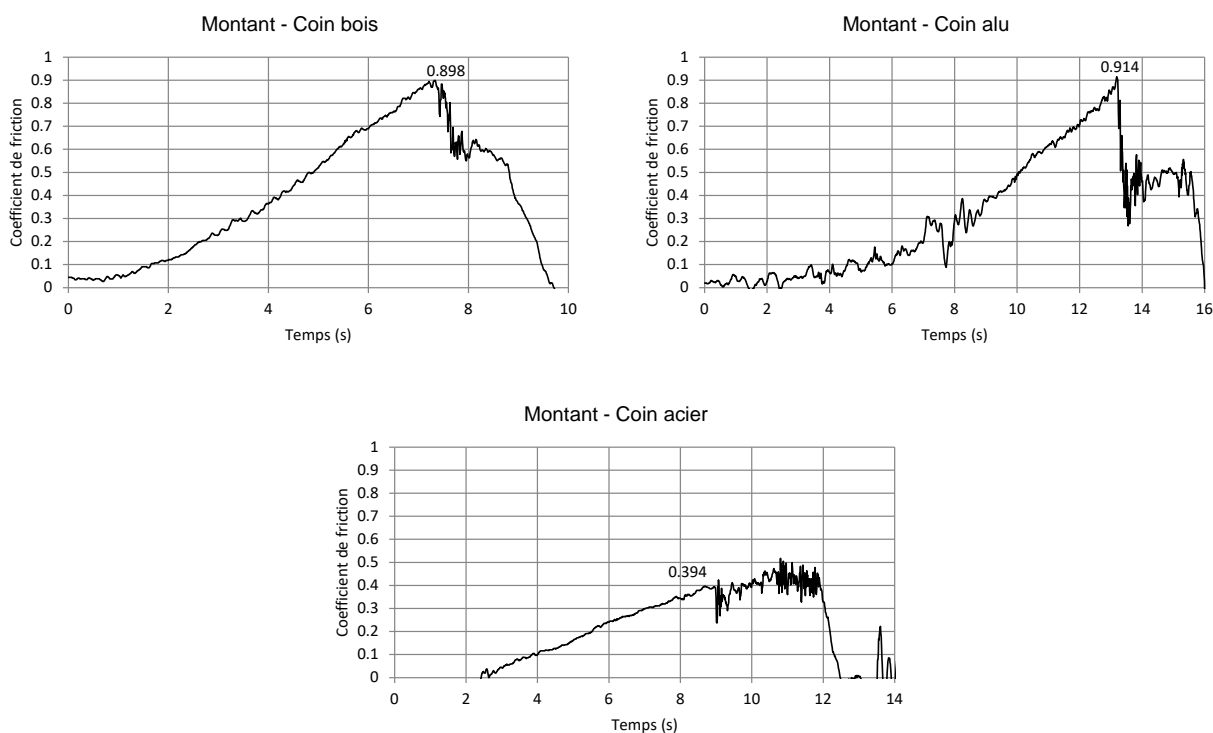


Figure 24. Coefficient de friction calculé lorsque l'échelle est appuyée sur les montants, en fonction de la surface d'appui.

Considérant les résultats présentés à la Figure 23 et à la Figure 24, une surface en acier sera considérée pour le sommet de l'échelle. Outre le fait que cette surface donne les coefficients de friction les plus faibles, elle présente aussi l'avantage de s'user moins rapidement, ce qui offrira une meilleure répétabilité pour les différents essais.

La Figure 25 présente les coefficients de friction mesurés en pied d'échelle. Ces courbes de coefficients de friction n'ont pas une allure classique, car le déplacement a été observé lors des essais avant que les pics de demande en friction ne soient atteints (déformation du caoutchouc en pied d'échelle). Ainsi, il est difficile de discriminer le coefficient de friction statique et dynamique. Les valeurs de coefficient de friction estimées pour le carrelage dans ces essais sont comparables aux valeurs publiées dans la littérature scientifique, tant pour une surface sèche que mouillée (Chang, W. R. *et al.*, 2005).

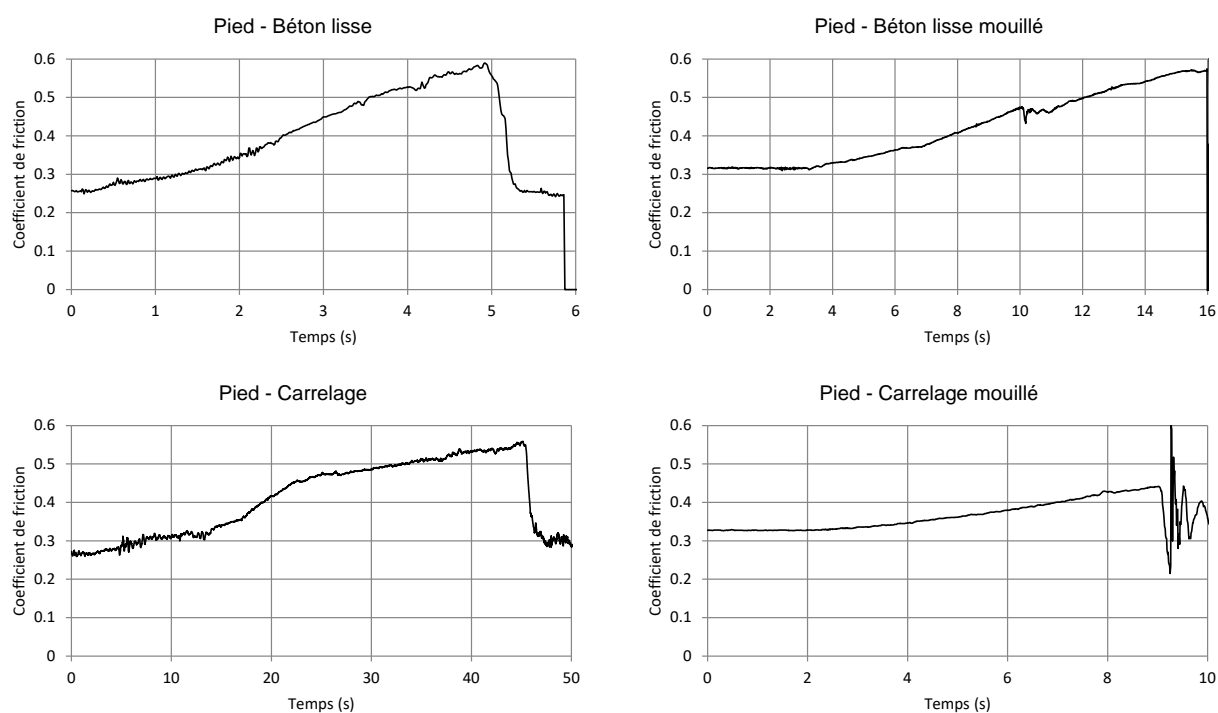


Figure 25. Coefficient de friction calculé au pied de l'échelle, en fonction de la surface d'appui.

Le Tableau 10 résume les coefficients de frottement mesurés pour chaque surface, en tête et en pied d'échelle. Les coefficients de friction les plus faibles sont obtenus pour l'acier au sommet de l'échelle, et pour le carrelage lorsqu'en pied de l'échelle. Il convient néanmoins de vérifier si la séquence de mouvements 4.2.1 conduit à des observations similaires à celles obtenues en mesure directe des coefficients de friction.

Tableau 10. Résumé des coefficients de frottement pour chaque surface

Surface	COF
Acier	0,412
Bois	0,565
Brique	0,536
Gypse	0,472
Coin acier	0,394
Coin alu	0,914
Coin bois	0,898
Carrelage	0,53
Carrelage mouillé	0,39
Béton poli	0,55
Béton poli mouillé	0,55

5.1.2 Essais de stabilité pour les différentes surfaces d'appui

Le Tableau 11 présente les demandes maximales en friction calculées en pied (DF Pied) et au sommet (DF Sommet) de l'échelle pour la séquence de mouvements décrite dans la section 4.2.1, selon les équations (1) et (2). Ces demandes maximales sont comparées aux COF maximaux mesurés, qui présentés au Tableau 10 (par exemple, pour l'acier, DF Sommet %maxCOF est calculé de la manière suivante : $0,276/0,412 = 66,9 \%$). Des valeurs inférieures à 100 % indiquent qu'il n'y a pas de risque de glissement. Le Tableau 12 présente les résultats des essais réalisés lorsque l'échelle est appuyée sur ses montants au lieu d'être appuyée en son sommet.

$$DF \text{ Sommet} = \frac{R_{3Y} + R_{4Y}}{R_{3X} + R_{4X}} \quad (1)$$

$$DF \text{ Pied} = \frac{R_{1Z} + R_{2Z}}{R_{1X} + R_{2X}} \quad (2)$$

Tableau 11. Demandes maximales en friction pour l'échelle appuyée en son sommet

Surface sommet	Surface pied	DF Sommet	DF Pied	DF Sommet %maxCOF	DF Pied %maxCOF
Acier	Béton poli	0,276	0,449	66,9 %	81,7 %
Acier	Carrelage	0,290	0,442	70,4 %	83,5 %
Bois	Béton poli	0,254	0,427	45,0 %	77,6 %
Brique béton	Béton poli	0,269	0,414	50,2 %	75,3 %
Gypse	Béton poli	0,397	0,390	84,2 %	70,9 %
Gypse	Carrelage	0,349	0,482	73,9 %	91,0 %

Tableau 12. Demandes maximales en friction pour l'échelle appuyée sur ses montants

Surface montant	Surface pied	DF Sommet	DF Pied	DF Sommet %maxCOF	DF Pied %maxCOF
Coin acier	Carrelage mouillé	0,266	0,455	67,6 %	116,6 %
Coin alu	Béton poli	0,429	0,618	46,9 %	112,4 %
Coin alu	Carrelage	0,427	0,702	46,8 %	132,4 %
Coin bois	Béton poli	0,191	0,717	21,3 %	130,4 %
Coin bois	Béton poli mouillé	0,259	0,699	28,8 %	127,2 %
Coin bois	Carrelage	0,310	0,610	34,5 %	115,1 %

Le Tableau 11 montre que la demande maximale en friction horizontale en pied d'échelle est atteinte pour essais réalisés sur du carrelage, et le constat est similaire pour le Tableau 12. Les demandes en friction horizontale en pied d'échelle dépassent 100 % lorsque l'échelle est appuyée sur ses montants. Ceci s'explique par le fait que la longueur entre les deux appuis de l'échelle est plus courte (5,4 m environ contre 6,55 m, soit 18 % de moins environ), engendrant

une rigidité plus grande de l'échelle et donc une distribution d'effort plus importante horizontalement lors des impulsions données sur l'échelle par l'expérimentateur.

Néanmoins, ces demandes maximales en friction horizontale étant de très courte durée du fait de la nature du chargement impulsif (voir Figure 26), aucun déplacement significatif n'a pu être observé en pied d'échelle, pour le cas des matériaux secs. Le cas du carrelage mouillé est présenté en Figure 27. Dans ce cas, un glissement du pied de l'échelle est survenu dès la première impulsion, et le pied est venu se caler contre la partie verticale de retenue au niveau de la surface d'appui. Rappelons que l'installation d'une échelle sur une surface souillée, que ce soit par de l'eau, un lubrifiant ou un matériau granulaire comme du sable est à proscrire. Une échelle devrait toujours être installée sur une surface propre et sèche.

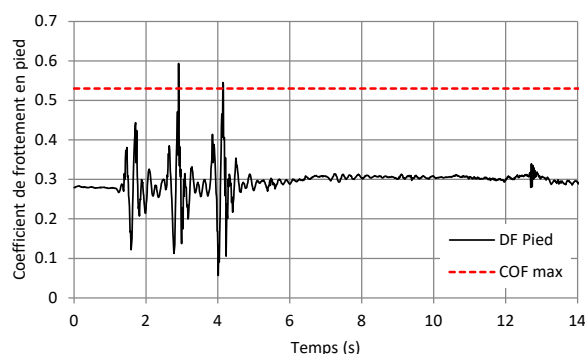


Figure 26. Demande en friction au pied de l'échelle pour l'essai M21-70-COINBOIS-CAR-15-SD-1.

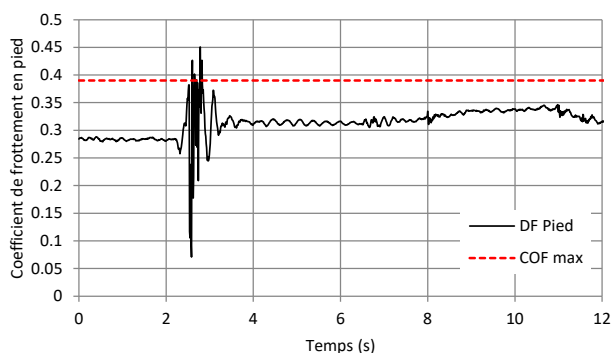


Figure 27. Demande en friction au pied de l'échelle pour l'essai M21-70-COINACIER-CARWET-15-SD-1.

Dans le cas de la demande en friction latérale, la demande maximale est atteinte pour le gypse (Tableau 11). Néanmoins, le gypse est un matériau qui va se dégrader progressivement au fur et à mesure des essais. D'ailleurs, la Figure 9 montre que la plaque de gypse est marquée par les quelques essais qu'elle a subis. Ainsi, considérant que le coefficient de friction le plus faible a été mesuré sur l'acier (Tableau 10), que ce matériau se dégradera moins lors des essais successifs, et que ce matériau donne la deuxième demande en friction la plus élevée (en DF Sommet %maxCOF) lorsque l'échelle est appuyée en son sommet (Tableau 11) et la plus élevée lorsque

l'échelle est appuyée sur ses montants (Tableau 12), c'est ce matériau qui sera retenu pour la suite de l'étude.

Il est à noter qu'à l'exception du cas où l'échelle était installée sur du carrelage mouillé, aucun glissement n'a pu être observé en pied d'échelle lors des 36 essais de stabilité, malgré les trois impulsions données par E1. Également, aucun glissement n'a été observé au sommet de l'échelle ou lorsqu'elle était appuyée sur ses montants.

En conséquence des observations et résultats indiqués dans cette section, les essais de stabilité subséquents faisant appel à la séquence de mouvements décrite en section 4.2.1 seront réalisés avec les surfaces suivantes : de l'acier au sommet de l'échelle, et du carrelage en pied d'échelle.

5.2 Essais de stabilité sur les échelles

5.2.1 Interprétation des forces mesurées en pied et au sommet de l'échelle

La Figure 28 montre les forces mesurées à chaque point d'appui de l'échelle, perpendiculairement aux surfaces d'appui : les forces mesurées en pied sont donc verticales et les forces mesurées au mur sont donc horizontales. Sur cette figure et les suivantes, les forces mesurées correspondant à chacune des trois positions de la séquence de mouvement sont identifiées. Pour la position P1, lorsque l'expérimentateur se met en position reculée, les forces mesurées au mur diminuent, alors que les forces en pied d'échelle restent à peu près constantes. Pour la position P2, lorsque l'expérimentateur se penche sur le côté de l'échelle les forces du côté droit de l'échelle (au pied et au sommet de l'échelle) diminuent, tandis que les forces augmentent du côté gauche de l'échelle. Enfin, pour la position P3, les forces mesurées au mur diminuent, de manière similaire à la position P1, mais de manière un peu plus prononcée, ce qui correspond au cas où l'expérimentateur se retourne sur l'échelle pour regarder derrière lui.

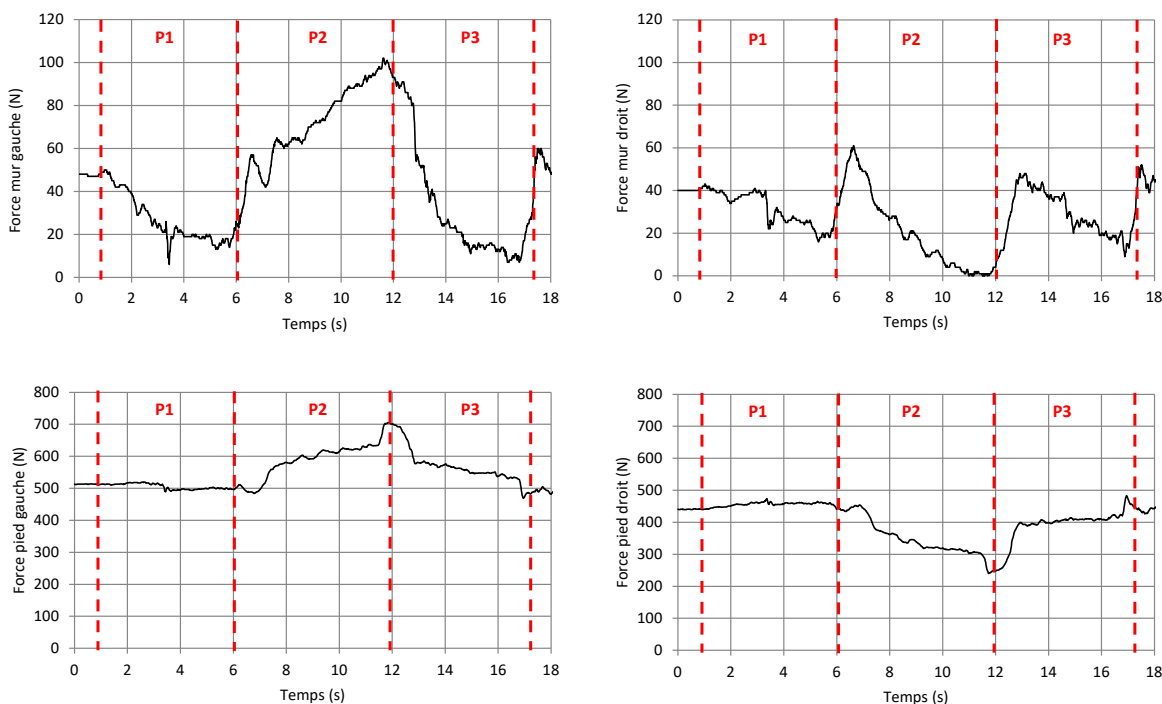


Figure 28. Résultat de l'essai M12-75-ACIER-CAR-6-SD-E2-2 – Forces en pied et tête d'échelle.

La méthode d'estimation de la position des CDG échelle-expérimentateur est présentée en Annexe A. La Figure 29 montre l'évolution de la position du CDG avant-arrière du système échelle-expérimentateur, calculé selon l'équation (11) lors de la réalisation de la séquence de mouvements contrôlés. Pour les positions P1 et P3, la distance entre le CDG et les pieds de l'échelle diminue. La valeur la plus faible obtenue est inférieure à 10 cm, ce qui signifie que l'on est relativement proche du point de perte de stabilité de l'échelle pour le cas basculement arrière. Pour la position P2, la distance entre le CDG gauche-droite du système échelle-expérimentateur calculé selon l'équation (14) et le côté de l'échelle diminue. La valeur minimale atteinte est de 12 cm environ, ce qui laisse une faible marge de sécurité vis-à-vis de la perte de stabilité de type retournement.

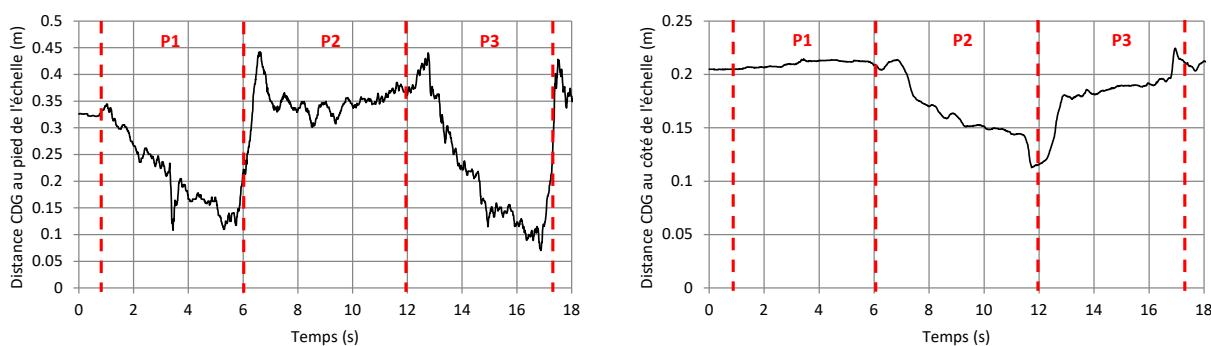


Figure 29. Résultat de l'essai M12-75-ACIER-CAR-6-SD-E2-2 – Position du CDG calculée.

Finalement, la Figure 30 montre les demandes en friction horizontale en pied d'échelle et latérale au sommet de l'échelle. La demande en friction horizontale est très inférieure à la limite mesurée dans les essais préliminaires, et ce, quelle que soit la position de l'expérimentateur sur l'échelle, alors que la demande en friction latérale est relativement proche de la limite pour la position P2 (penché sur le côté).

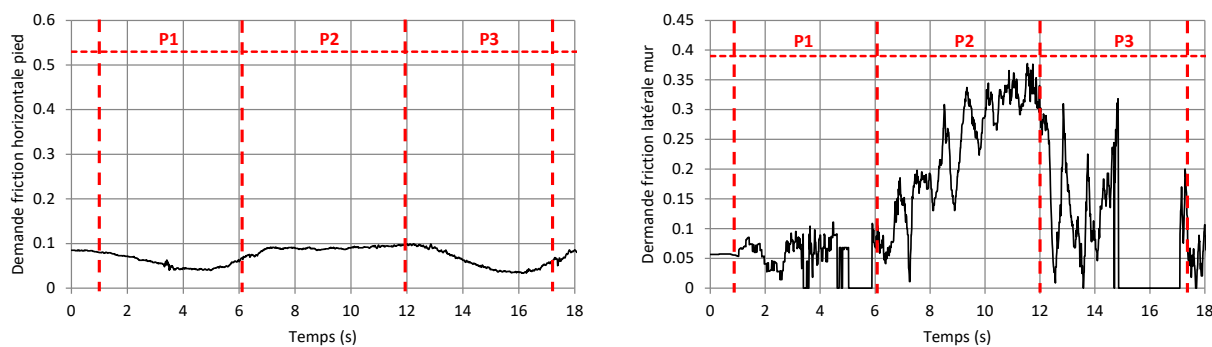


Figure 30. Résultat de l'essai M12-75-ACIER-CAR-6-SD-E2-2 – Demande en friction horizontale (au pied) et latérale (au sommet).

Plutôt que de détailler les résultats de chacun des essais en présentant les courbes obtenues, il a été décidé d'extraire les valeurs limites pour chacune des positions lors de la séquence de mouvements réalisée pour chacun des essais. Les valeurs moyennes sur une durée de 0,2 seconde sont utilisées pour chacune des positions. Les résultats synthétiques, obtenus par une moyenne des trois essais pour chaque configuration, sont présentés et discutés aux sections suivantes.

5.2.2 Échelle non déployée

5.2.2.1 Influence de la position de l'expérimentateur

La Figure 31 présente la position du CDG du système échelle-expérimentateur pour les trois positions adoptées successivement lors de la séquence de mouvement présentée en section 4.2.1. Lorsque la distance entre le CDG et le côté gauche ou l'arrière de l'échelle est nulle, cela signifie que le système est instable, et qu'un risque d'instabilité existe lorsque cette distance est proche de zéro. La position du CDG avant-arrière au repos a tendance à s'éloigner du pied de l'échelle lorsque l'on monte sur l'échelle, et ce constat est également valable pour les positions 1 et 3 : plus on est haut sur l'échelle, plus le risque de basculement arrière diminue. Dans le cas de la position 2, les résultats des essais M12-75 (échelle de 24' en aluminium non déployée, installée à un angle de 75 °) semblent indiquer que la position du CDG gauche-droite a tendance à se rapprocher de la valeur neutre (22 cm environ, voir en Annexe A) lorsque l'expérimentateur est plus haut sur l'échelle. Les constats tirés de la Figure 31 sont comparés dans les pages suivantes pour les généraliser et étudier l'influence d'autres paramètres.

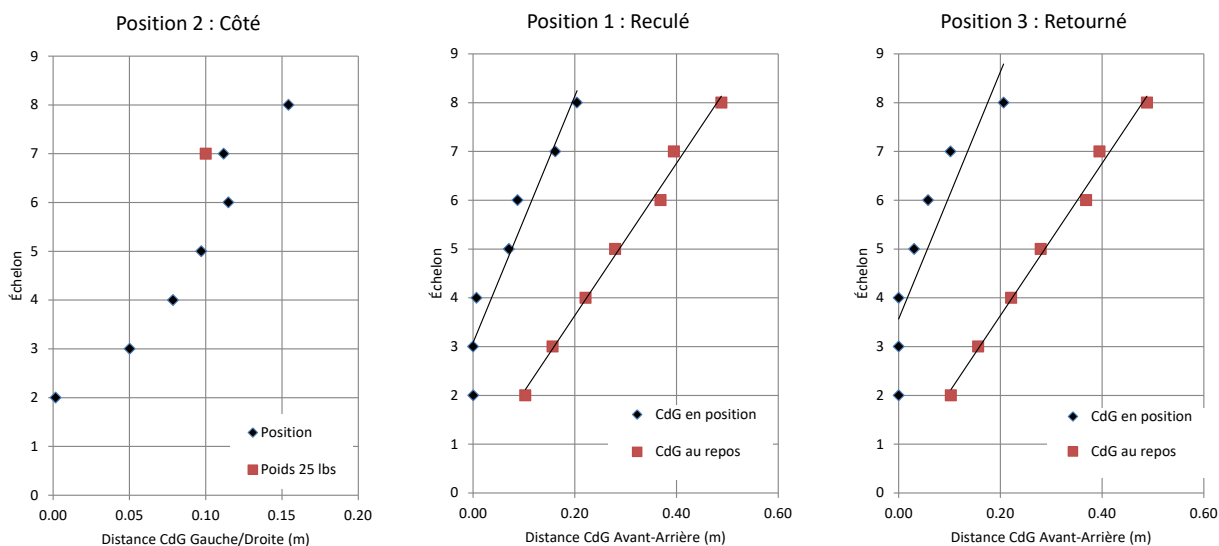


Figure 31. Résultats des essais M12-75 - Position du CDG.

La Figure 32 présente une comparaison de la position du CDG avant-arrière pour les positions 1 et 3, pour les deux expérimentateurs (E1 et E2) et l'expérimentateur 2 équipé d'une veste lestée et de mousquetons à la ceinture (E2+WV), dans le cas d'une échelle en aluminium installée à 75 °, en fonction de la hauteur de l'expérimentateur sur l'échelle. La Figure 33 est similaire à la Figure 32, mais pour un angle de 72,5 ° et les expérimentateurs E1 et E2 seulement. Pour ces deux figures, globalement le CDG pour la position 3 est à une plus faible distance du pied de l'échelle que pour la position 1, ce qui signifie que la position 3 (retourné arrière, bras tendu) présente un risque de basculement arrière plus élevé.

D'après la Figure 33, l'écart de la position du CDG entre les positions 1 et 3 est plus marqué pour un angle de 72,5 °.

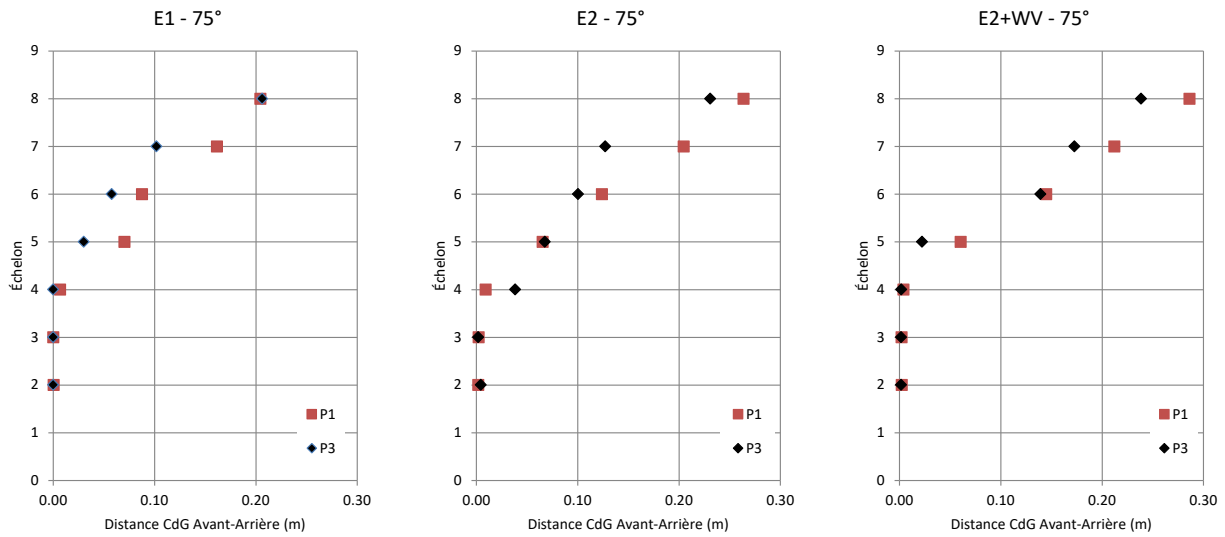


Figure 32. Comparaison des distances au CDG échelle-expérimentateur pour les positions 1 et 3.

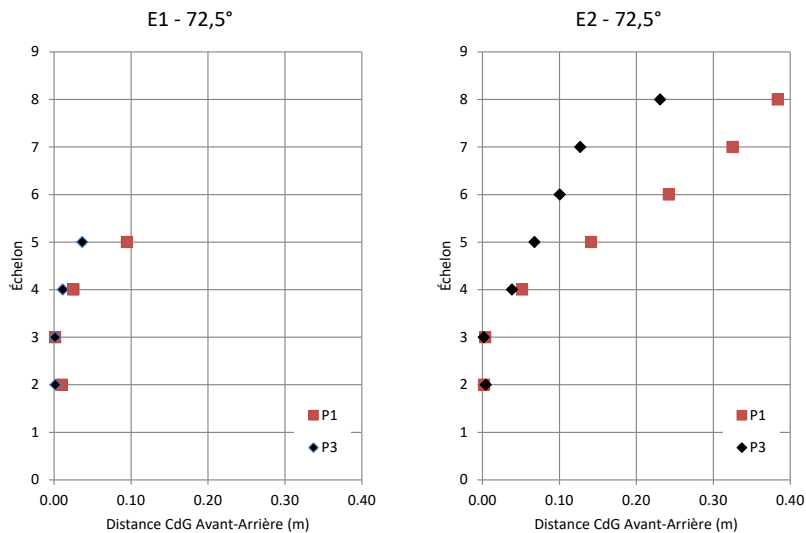


Figure 33. Comparaison des distances au CDG échelle-expérimentateur pour les positions reculé et retourné, dans le cas d'une échelle installée à 72,5°.

5.2.2.2 Influence de l'angle de l'échelle

La Figure 34 permet de comparer la position des CDG pour E1, en fonction de la hauteur à laquelle il se trouve sur l'échelle et de l'angle auquel est installée l'échelle en aluminium. Pour la position 2, la position du CDG semble être dans l'intervalle 10 à 15 cm, soit 7 à 12 cm de décalage sur la gauche par rapport à la position neutre (22 cm environ). Dans le cas des positions 1 et 3, plus l'angle auquel est installé l'échelle est grand, plus la distance du CDG au pied de l'échelle est faible, ce qui correspond à un risque d'instabilité plus grand. Plus spécifiquement, dans le cas de E1, le risque d'instabilité est présenté au Tableau 13. En position P2, l'angle ne semble pas

avoir d'influence marquée, l'instabilité est restreinte aux échelons 2 et 3. Pour les positions P1 et P3 en revanche, les résultats montrent clairement que plus l'angle augmente, plus le risque d'instabilité augmente et il faut aller haut sur les échelons pour limiter ces risques d'instabilité (jusqu'à l'échelon 6 pour un angle de 75 ° en P3). Et ce phénomène est plus marqué pour la position P3 que pour la P2.

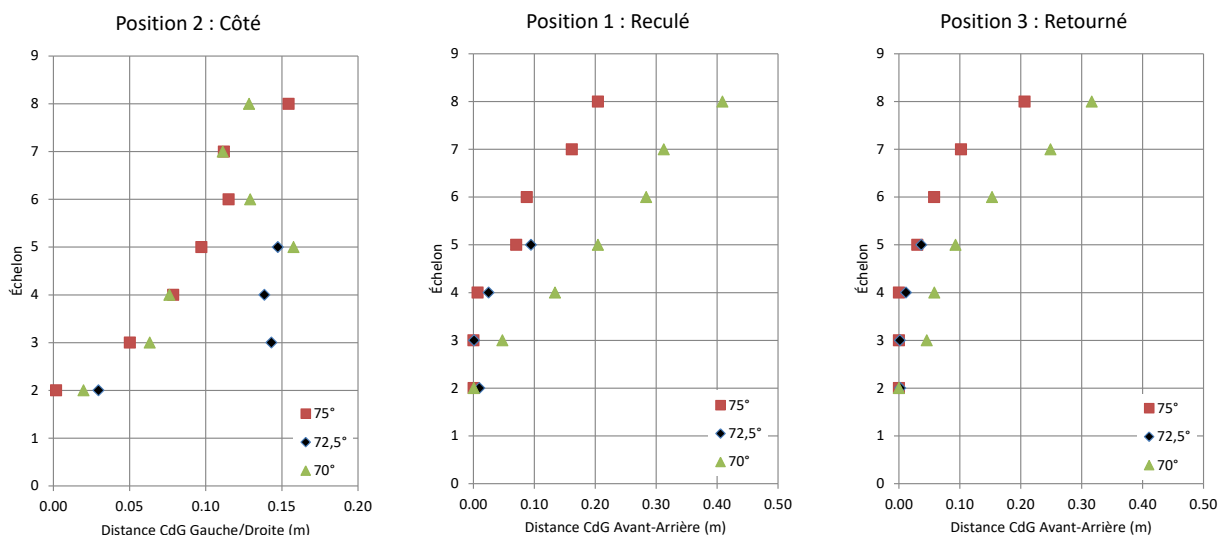


Figure 34. Comparaison des distances au CDG échelle-expérimentateur 1 pour une échelle en aluminium non déployée installée à différents angles.

Tableau 13. Risque d'instabilité en fonction de l'angle et de la hauteur sur l'échelle pour E1

Échelon	P2			P1			P3		
	70 °	72,5 °	75 °	70 °	72,5 °	75 °	70 °	72,5 °	75 °
2	X	X	X	X	X	X	X	X	X
3	X		X	X	X	X	X	X	X
4					X	X	X	X	X
5								X	X
6									X
7									
8									

Les considérations générales tirées de la Figure 34 et du Tableau 13 sont également valides pour E2, comme le montrent la Figure 35 et le Tableau 14 : plus l'angle d'installation de l'échelle est grand, plus le risque d'instabilité est important. Le fait que E2 soit plus léger et plus petit que E1 semble entraîner une diminution du risque d'instabilité. Ceci est discuté à la section suivante.

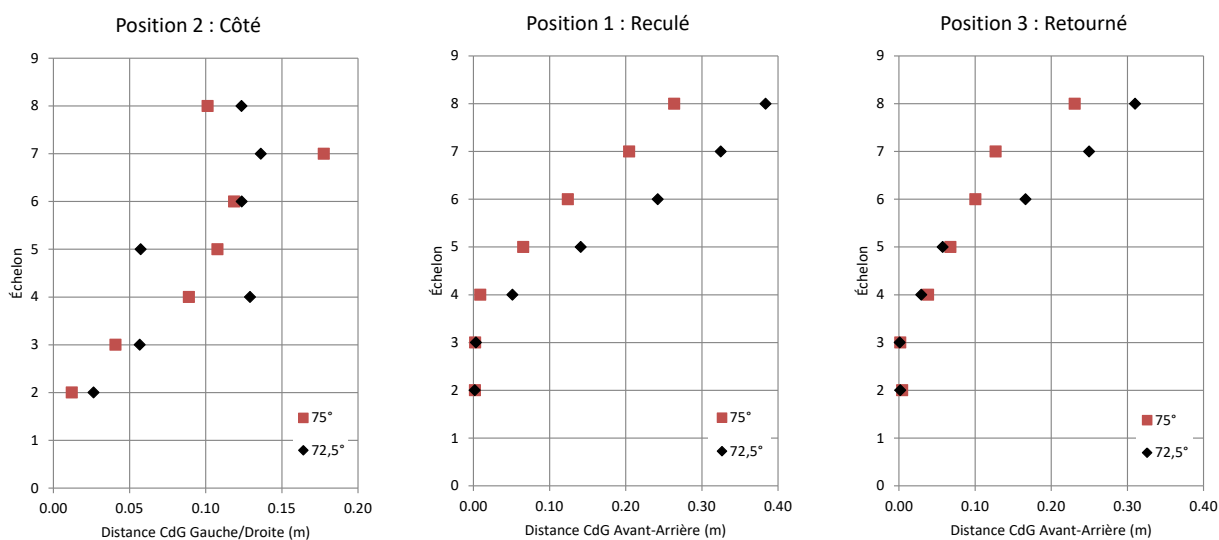


Figure 35. Comparaison des distances au CDG échelle-expérimentateur 2 pour une échelle en aluminium non déployée installée à différents angles.

Tableau 14. Risque d'instabilité en fonction de l'angle et de la hauteur sur l'échelle pour E2

Échelon	P2		P1		P3	
	72,5 °	75 °	72,5 °	75 °	72,5 °	75 °
2	X	X	X	X	X	X
3			X	X	X	X
4			X	X	X	X
5						X
6						
7						
8						

5.2.2.3 Influence de l'expérimentateur

La Figure 36 présente une comparaison de la position du CDG pour les expérimentateurs E1, E2 et E2+WV, en fonction de la hauteur à laquelle ils se trouvent sur l'échelle, pour échelle installée à 75°. Dans tous les cas, E1 est plus exposé à un risque d'instabilité que E2, ce qui est attendu étant donné que E1 est à la fois plus grand (CDG plus haut) et plus lourd que E2.

Dans le cas de E2, équipé ou non d'une veste lestée, les résultats sont moins intuitifs. E2+WV présente un risque d'instabilité plus important sur les échelons du bas de l'échelle (2 à 5) : son CDG corporel (incluant le poids de la veste lestée et des mousquetons) est situé significativement en arrière du CDG de l'échelle, ce qui a tendance à diminuer la distance du CDG du système expérimentateur-échelle et donc à augmenter le risque d'instabilité. Au-delà du sixième échelon, par rapport à E2, E2+WV présente un risque de basculement arrière plus faible, car la position physique de son CDG est la même que pour E2 (environ au même endroit que le CDG de l'échelle ou plus loin des pieds), mais son poids est plus important, ainsi, la stabilité du système échelle-

expérimentateur est accrue. Ainsi, afin de simuler le risque d'instabilité sur les plus bas échelons d'une échelle, équiper un travailleur d'une veste lestée serait une option envisageable.

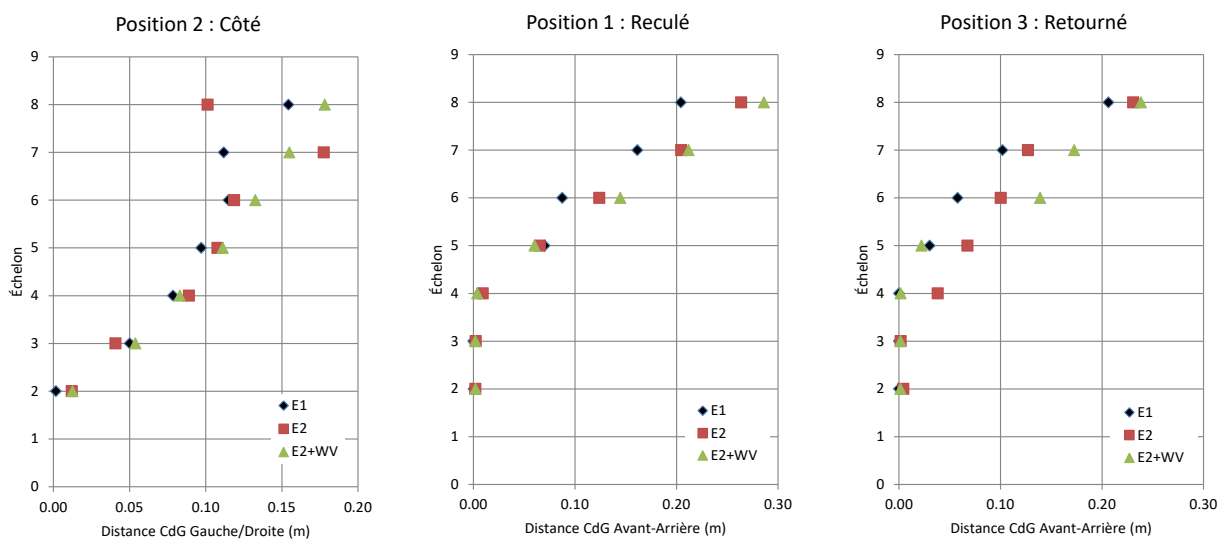


Figure 36. Comparaison des distances au CDG échelle-expérimentateur pour une échelle en aluminium non déployée installée à 75 °.

La Figure 37 présente une comparaison de la position du CDG pour les expérimentateurs E1 et E2, en fonction de la hauteur à laquelle ils se trouvent sur l'échelle, pour échelle installée à 72,5 °. Comme dans le cas de la Figure 36, E1 présente un risque de basculement arrière plus important que E2, du fait de sa taille et de son poids plus élevés.

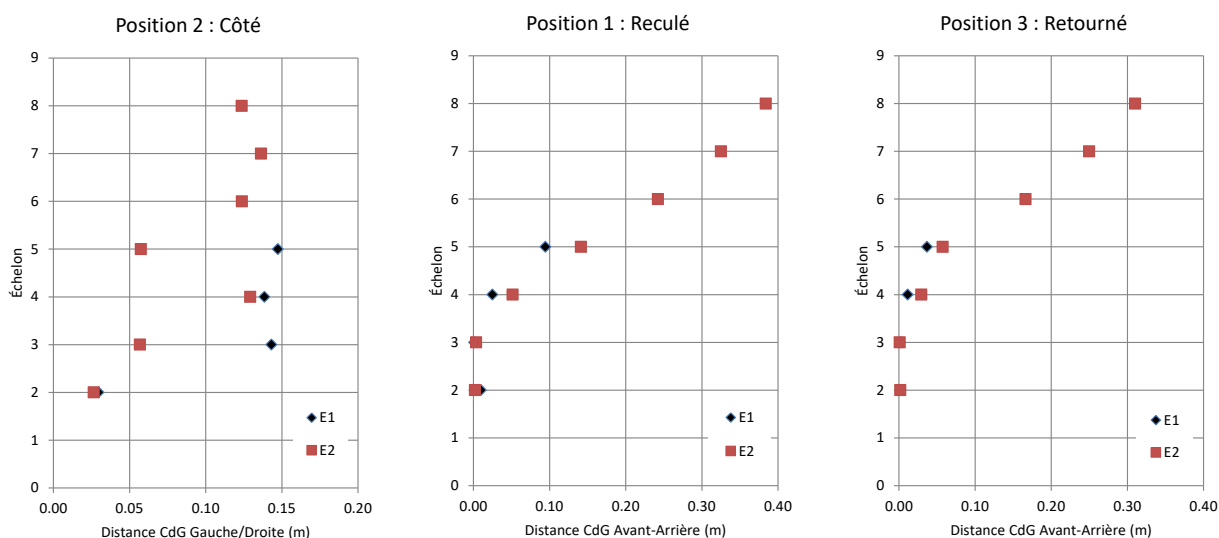


Figure 37. Comparaison des distances au CDG échelle-expérimentateur pour une échelle en aluminium non déployée installée à 72,5 °.

Le Tableau 15 présente la distance entre le CDG du système échelle-expérimentateur lorsque E2 est au repos, et lorsqu'il est en position P1 ou P3, dans le cas d'une échelle en aluminium de 24', non déployée et installée à un angle de 72,5 °. Les cellules identifiées en rouge sont celles pour lesquelles une instabilité a été observée lors de l'essai. En conséquence, la distance entre le CDG du système au repos et en position ne pouvait être évaluée. Les résultats indiquent qu'en moyenne, le CDG du système est 208 mm plus proche du pied de l'échelle pour la position P1, et 282 mm dans le cas de la position P3, soit 74 mm d'écart entre les deux positions. En conséquence, lorsque le travailleur au repos se trouve sur un échelon pour lequel le CDG du système est inférieur à 280 mm environ, un risque d'instabilité existe.

Tableau 15. Distance entre le CDG au repos et en position pour E2, en fonction de la hauteur sur l'échelle, pour une échelle en aluminium non déployée installée à 72,5 °

Échelon	Distance entre le CDG au repos et en position (m)	
	P1	P3
2	-	-
3	-	-
4	0,221	-
5	0,213	0,297
6	0,197	0,273
7	0,206	0,281
8	0,203	0,276
Moyenne	0,208	0,282
Écart P3-P1	-	0,074

Le Tableau 16 présente la distance entre le CDG du système échelle-expérimentateur lorsque les expérimentateurs E1, E2 et E2+WV sont au repos, et lorsqu'ils sont en position P1 ou P3, dans le cas d'une échelle en aluminium non déployée installée à un angle de 75 °. Les cellules identifiées en rouge sont celles pour lesquelles une instabilité a été observée lors de l'essai. Les résultats montrent, qu'aux erreurs expérimentales près, les distances moyennes pour E2 et E2+WV sont les mêmes, soit environ 195 mm pour P1 et 230 mm pour P3. Ce résultat était attendu étant donné que l'expérimentateur est de taille constante, ce qui induit que la position de son CDG varie peu (la hauteur du CDG peut varier un peu du fait de la position du poids ajouté par la veste lestée et les mousquetons). L'écart observé entre les positions P1 et P3 est de l'ordre de 32 mm pour tous les expérimentateurs, pour une échelle installée à un angle de 75 °.

Tableau 16. Distance entre le CDG au repos et en position pour les expérimentateurs, en fonction de la hauteur sur l'échelle, pour une échelle en aluminium non déployée installée à 75 °

Échelon	Distance entre le CDG au repos et en position (m)					
	P1			P3		
	E1	E2	E2+WV	E1	E2	E2+WV
2	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-
5	0,200	0,188	0,209	0,225	0,186	0,247
6	0,246	0,197	0,195	0,279	0,220	0,201
7	0,202	0,204	0,194	0,236	0,281	0,234
8	0,235	0,182	0,196	0,266	0,215	0,241
Moyenne	0,219	0,193	0,198	0,251	0,226	0,231
Écart P3-P1	-	-	-	0,032	0,033	0,032

5.2.2.4 Influence du type d'échelle

La Figure 38 présente une comparaison de la position du CDG de E2, en fonction de sa hauteur sur l'échelle, pour une échelle en aluminium et une échelle en fibre de verre, non déployées, et installées à un angle de 75 °. Le risque d'instabilité est moins présent pour une échelle en fibre de verre que pour une échelle en aluminium : le poids plus élevé de l'échelle en fibre de verre augmente la stabilité du système. Cet état de fait sera d'autant plus marqué que l'utilisateur de l'échelle est léger. Pour un travailleur très lourd, l'écart observé serait très certainement moins important. Ceci sera vérifié à l'aide du modèle analytique (chapitre 6).

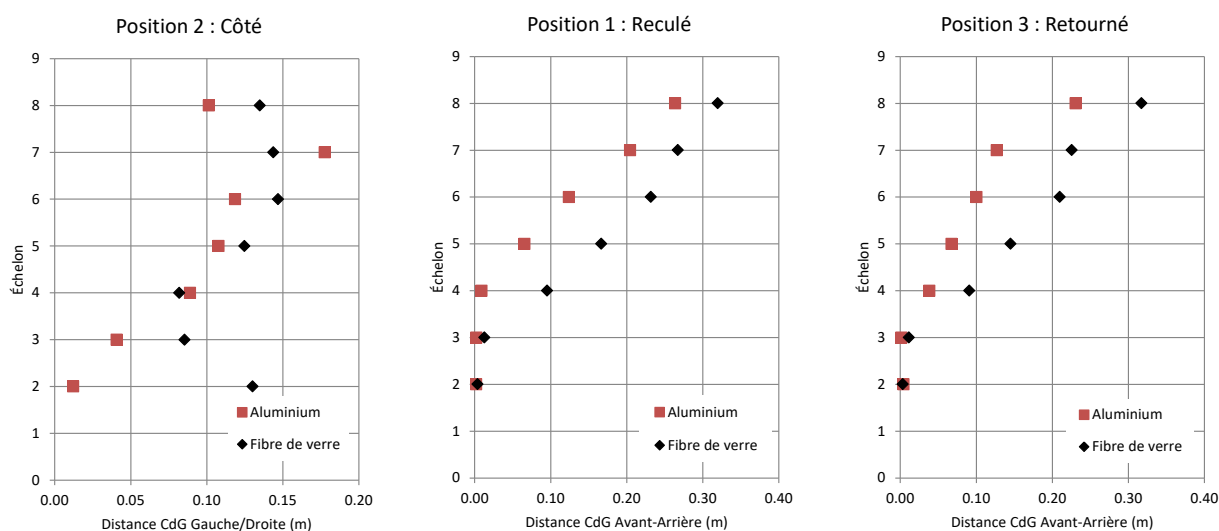


Figure 38. Comparaison des distances au CDG échelle-expérimentateur 2 pour une échelle en aluminium ou en fibre de verre non déployée, installée à 75 °.

5.2.2.5 Transmission de poids sur le côté

La Figure 39 présente la séquence de mouvements qui a été réalisée pour simuler le cas d'une récupération d'objet lourd sur le côté de l'échelle. Dans un premier temps, l'expérimentateur sur l'échelle se saisit du poids de 25 lb (photo de gauche), et l'amène jusqu'à sa taille (photo du centre), puis il le transmet à nouveau à son collègue situé sur la plateforme élévatrice (photo de droite), simulant ainsi le dépôt d'un objet pesant sur le côté de l'échelle.



Figure 39. Transmission d'un poids de 25 lb sur le côté.

Les forces mesurées lors de cette séquence de mouvement ont permis de calculer la position latérale du CDG du système échelle-expérimentateur. La Figure 40 présente l'évolution de la position gauche-droite du CDG du système échelle-expérimentateur lors de la réalisation de la séquence de mouvements présentée en Figure 39. La ligne pointillée représente la position d'équilibre naturel de l'échelle, soit la moitié de la distance entre les montants (22 cm environ). Le premier pic correspond au moment où l'expérimentateur positionne ses pieds sur l'échelon en prévision de se pencher sur le côté gauche. Le deuxième pic correspond au moment où l'expérimentateur récupère le poids de 25 lb. Puis le pic 3 correspond au moment où le poids de 25 lb est transmis à la personne se trouvant dans la plateforme élévatrice. C'est à ce moment-là que la distance du CDG est la plus faible, ce qui correspond au cas le moins sécuritaire.

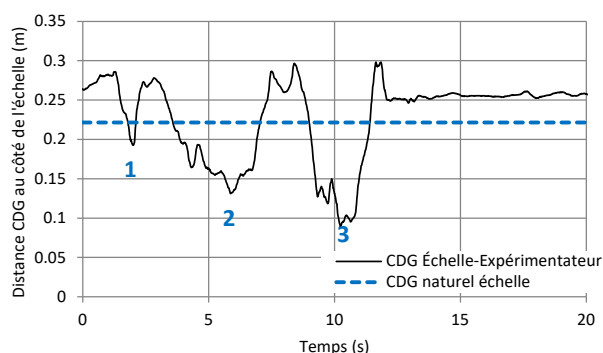


Figure 40. Position du CDG latéral échelle-expérimentateur 1 lors de la transmission d'un poids de 25 lb, pour une échelle non déployée installée à 75 °.

Aucun des essais réalisés n'a permis de donner une instabilité de type retournement. La Figure 41 présente la position du CDG gauche-droite du système échelle-expérimentateur pour l'échelle non déployée, installée à 70° ou 75°, en fonction de la hauteur à laquelle se trouve l'expérimentateur. On ne note pas d'influence très significative sur la position du CDG du système échelle-expérimentateur. En effet, dans le cas des échelons 3 et 4, un des trois essais sur chacun de ces échelons a conduit à une instabilité de type retournement. Ceci se traduit par une distance du CDG gauche-droite égale à 0, ce qui fait baisser la moyenne calculée pour les trois essais sur cet échelon.

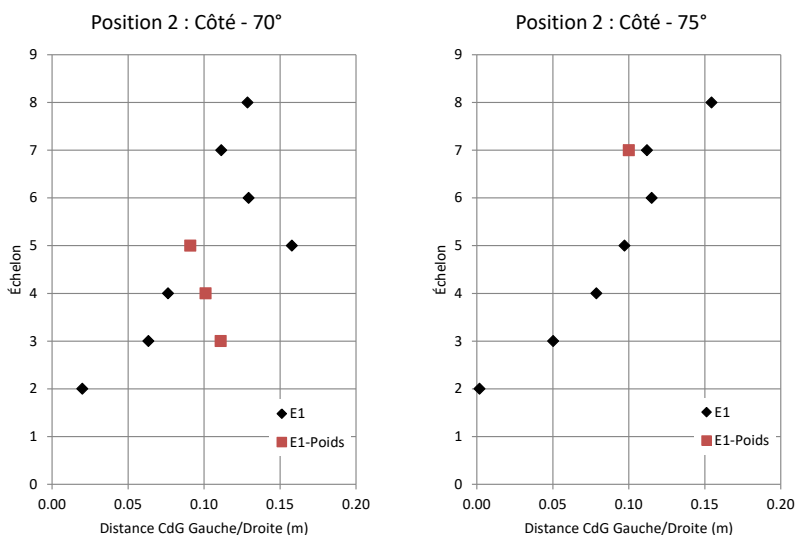


Figure 41. Comparaison des distances au CDG échelle-expérimentateur 1 lors de la transmission d'un poids de 25 lb.

Des essais supplémentaires seraient nécessaires pour valider le risque accru ou non de perte de stabilité lors de la récupération d'un objet sur le côté de l'échelle. Il est à noter que dans le cas présenté dans cette section, le poids récupéré sur le côté de l'échelle, bien que relativement lourd, était équipé d'une poignée, et était d'un volume restreint, ce qui permet à l'expérimentateur d'adopter rapidement une position stable en ramenant le poids à sa taille. Finalement, rappelons qu'il est fortement déconseillé de monter ou descendre une charge de l'échelle en la tenant à la main, car cela empêche de maintenir trois points de contact en tout temps.

La Figure 42 présente la demande en friction au sommet lors de la transmission du poids, pour une échelle non déployée installée à 70° et un expérimentateur sur l'échelon 5. La demande n'excède jamais la friction maximale admissible identifiée par la ligne pointillée rouge.

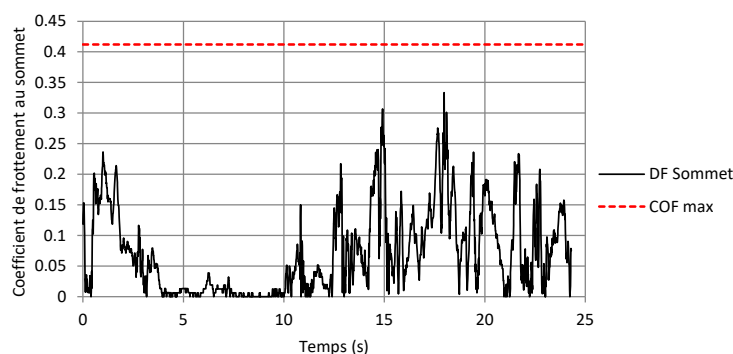


Figure 42. Demande en friction au sommet lors de la transmission d'un poids de 25 lb, pour une échelle non déployée installée à 70 ° et un expérimentateur sur l'échelon 5.

Dans le cas de la transmission de poids pour une échelle non déployée installée à 75 ° et un expérimentateur sur l'échelon 7 (Figure 43), la demande en friction est un peu plus élevée que le maximum admissible à quelques reprises. Le graphe de gauche présente la demande en friction cumulée pour les deux montants de l'échelle (DF Sommet), alors que le graphe de droite présente la demande en friction pour chaque montant de l'échelle. Dans le détail, les résultats indiquent que le montant de gauche (R3Y/R3X) n'excède qu'à un moment le maximum admissible en friction, alors que le montant de droite (R4Y/R4X) excède le maximum admissible en friction à quelques reprises. La demande en friction latérale est en réalité surtout supportée par le montant gauche de l'échelle puisque l'expérimentateur se penche et récupère le poids de 25 lb sur sa gauche. Ainsi, les quelques cas où la demande en friction latérale excède le maximum pour le montant de droite sont des cas où la réaction horizontale du mur est très faible. Ainsi, il n'y a pas eu de glissement significatif de l'échelle en son sommet lors de cet essai.

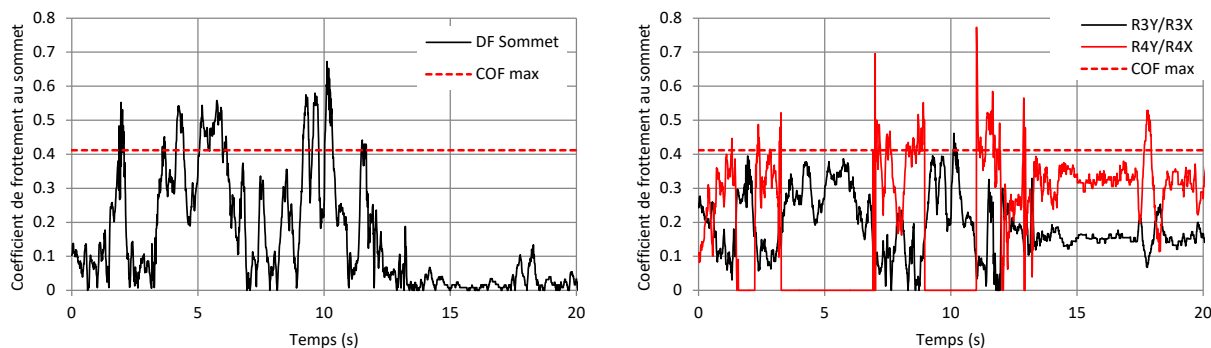


Figure 43. Demande en friction latérale lors de la transmission d'un poids de 25 lb, pour une échelle non déployée installée à 75 ° et un expérimentateur sur l'échelon 7.

5.2.2.6 Vissage sur le côté ou entre les montants de l'échelle

Plusieurs cas de vissage ont été considérés pour l'échelle en aluminium, non déployée, installée à 75 ° (cas critique pour le basculement arrière), avec E1. La Figure 44 présente les deux positions qui ont été étudiées pour installer une vis dans le contreplaqué, à l'aide d'une visseuse électrique, sur le côté droit de l'échelle. Dans le cas de la photo de gauche, le vissage s'effectue à environ 2 pieds du centre de l'échelle, alors que dans le cas de la photo de droite, le vissage

s'effectue à 3,5 pieds du centre de l'échelle. Dans ce dernier cas, E1 n'est presque pas en appui sur son pied gauche, et son sternum est situé à l'extérieur de la zone délimitée par les deux montants de l'échelle. La Figure 45 présente le cas où l'expérimentateur installe une vis entre les montants de l'échelle.

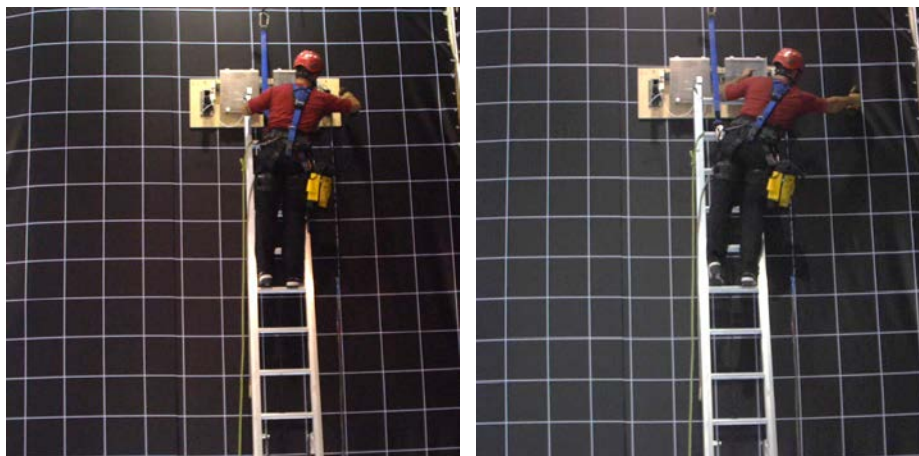


Figure 44. Vissage sur le côté de l'échelle.



Figure 45. Vissage entre les montants de l'échelle.

La Figure 46 présente l'évolution de la position des centres de gravité du système expérimentateur-échelle selon les axes avant-arrière et gauche-droite. Au total, 5 vis ont été installées. Les points 1 à 3 sur la Figure 46 représentent les cas des trois vis installées sur le côté (position la plus éloignée pour les points 1 et 3, représentée par un CDG très éloigné du côté gauche de l'échelle, et moyennement éloignée pour le point 2). Les points 4 et 5 correspondent aux deux vis installées entre les montants de l'échelle (cas où le CDG est proche de sa position naturelle, représentée par la ligne en pointillés rouges sur la Figure 46). Lors de l'installation des vis, la distance entre le CDG du système expérimentateur-échelle et les pieds de l'échelle diminue, rapprochant ainsi le système d'une possible instabilité (distance égale à 0). Dans le cas des vis 1 à 3, la réduction de distance entre le CDG et les pieds de l'échelle est de l'ordre de 15 à 20 cm. Pour les vis 4 et 5, la diminution de distance est de l'ordre de 20 à 25 cm. Aucune instabilité de type basculement arrière n'a été observée pendant ces essais, néanmoins, il faut

noter que les essais ont été réalisés avec l'expérimentateur relativement haut sur l'échelle (septième échelon), ce qui correspond à un cas présentant un très faible risque de basculement arrière. Si cette opération de vissage avait été effectuée sur des échelons inférieurs, ou avec une échelle moins longue, un risque de basculement arrière aurait pu être présent, pour tous les échelons où le CDG du système au repos (expérimentateur droit) est inférieur ou égal à 20 cm dans le cas du vissage sur le côté (échelons 2 et 3), et 25 cm dans le cas du vissage entre les montants (échelons 2 à 4). Le risque de basculement arrière serait amplifié dans le cas d'un travailleur plus léger.

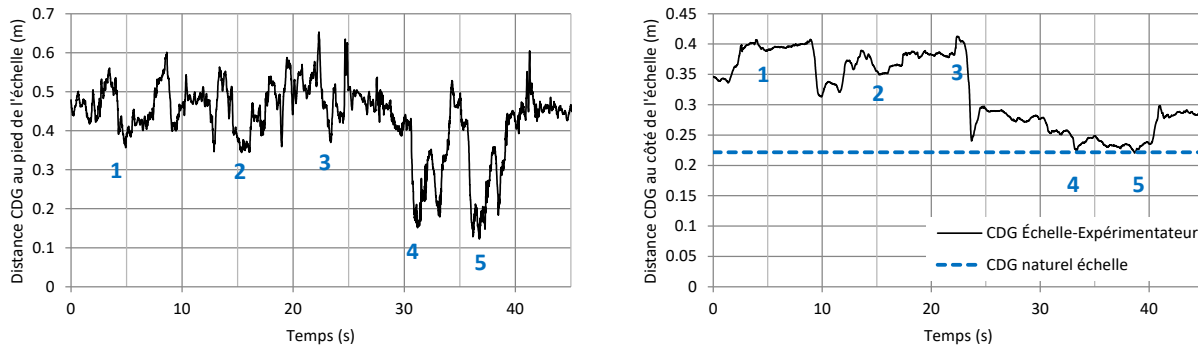


Figure 46. Position des CDG échelle-expérimentateur 1 lors du vissage sur le côté ou entre les montants de l'échelle.

La Figure 47 présente la demande en friction latérale lors du vissage sur le côté ou entre les montants de l'échelle. Les résultats indiquent que la demande en friction latérale est dépassée à quelques reprises lors de l'essai, cependant ces dépassements correspondent aux moments où l'expérimentateur s'est repositionné sur l'échelle (à environ 10 s et 23 s), ou aux moments où il procède au vissage entre les montants (à environ 32 s et 38 s), ce qui implique que la réaction horizontale du mur devient très faible. Globalement, et malgré les quelques dépassements identifiés à la Figure 47, aucune instabilité n'a été observée dans le cas du vissage.

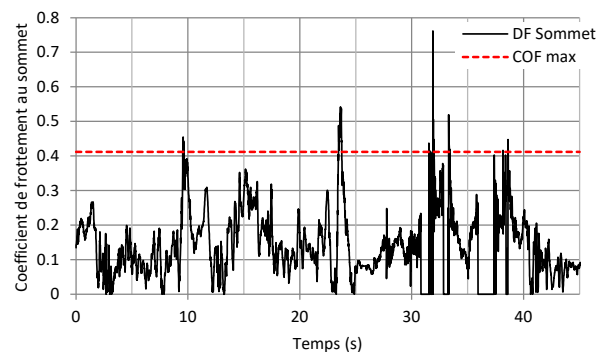


Figure 47. Demande en friction au sommet lors du vissage sur le côté ou entre les montants de l'échelle.

5.2.2.7 Montée de l'échelle

La Figure 48 présente les forces horizontale au mur et verticale en pied mesurées pour une montée et une descente de E1 sur une échelle non déployée installée à 72,5 °. La force verticale en pied est de l'ordre de 200 N au début et à la fin de l'enregistrement, ce qui correspond au poids de l'échelle. Entre les deux, la force verticale mesurée en pied d'échelle oscille autour d'une valeur de 1100 N, soit le poids de l'échelle et de l'expérimentateur. Les différents pics observés correspondent aux pas de l'expérimentateur lorsqu'il transfère son poids d'un échelon à l'autre, que ce soit en montée ou en descente. Finalement, la force horizontale au mur croît puis décroît : plus l'expérimentateur est haut sur l'échelle, plus la force horizontale va être importante.

E1 et E2 avaient tous deux un rythme de montée et de descente de type 2-temps : un pied et une main bougent simultanément. Un rythme de montée de type 4-temps serait caractérisé par un seul des quatre membres bougeant à la fois (Hammer et Schmalz, 1992; McIntyre, 1983). Plus spécifiquement, E1 adoptait une technique de montée à 2-temps latérale (le pied et la main bougeant simultanément sont du même côté du corps), alors que E2 adoptait une technique de montée à 2-temps diagonale (les membres bougeant simultanément sont : pied gauche-main droite ou pied droit-main gauche). Une étude récente s'intéressant à la technique de montée en lien avec le risque de chute n'a pas trouvé d'écart significatif entre les rythmes à 2-temps ou à 4-temps (Pliner et Beschorner, 2017). L'influence d'autres facteurs sur le risque de chute lors de la montée ou de la descente d'échelle a été étudiée par plusieurs chercheurs, notamment l'utilisation de gants ou le coefficient de friction entre l'échelon et la chaussure (Martin, Pliner, et Beschorner, 2020; Pliner, Seo, et Beschorner, 2017).

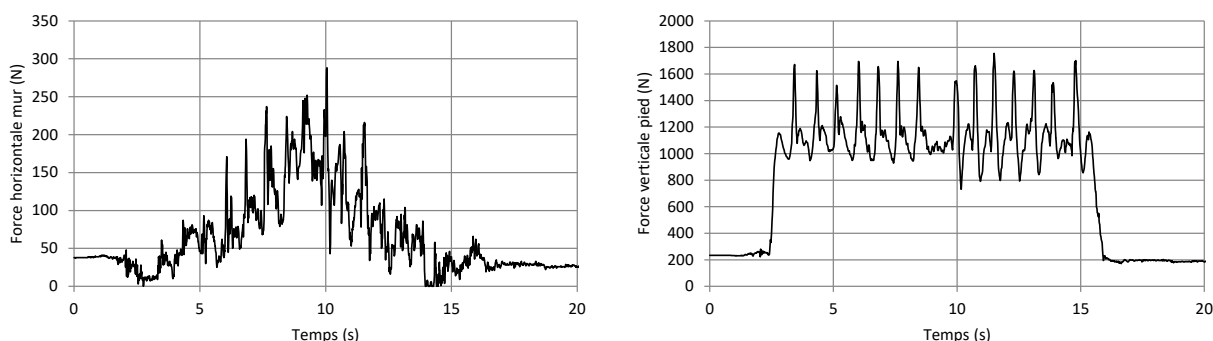


Figure 48. Résultat de l'essai M12-72,5-ACIER-CAR-MontéeCôté – Force horizontale au mur (au sommet) et force verticale (au pied).

Afin, d'estimer le risque de basculement arrière lors de la montée ou de la descente de l'échelle, il a été décidé de calculer la position du CDG expérimentateur-échelle pour chacun des essais de montée/descente qui ont été réalisés. Plus le CDG avant-arrière est proche de 0, plus le risque de basculement arrière est important. Concernant la position du CDG gauche/droite, plus la valeur indiquée sur le graphique est proche de 0, plus le risque de retournement vers la gauche est important (la position neutre serait à mi-distance entre les montants de l'échelle, soit 22 cm environ).

Deux techniques différentes de montée à l'échelle ont été comparées, soit la montée avec l'expérimentateur qui fait face à l'échelle, et la montée avec l'expérimentateur qui positionne son bassin de côté par rapport à l'échelle pour gravir les premiers échelons. La Figure 49 illustre ces

deux techniques pour le premier échelon de l'échelle, et la Figure 50 pour le deuxième échelon. Le fait de gravir les premiers échelons en positionnant son bassin de côté plutôt que face à l'échelle a pour effet de rapprocher le CDG de l'expérimentateur de l'échelle, et donc d'offrir une stabilité accrue. Ceci est notamment illustré par les résultats présentés à la Figure 51.

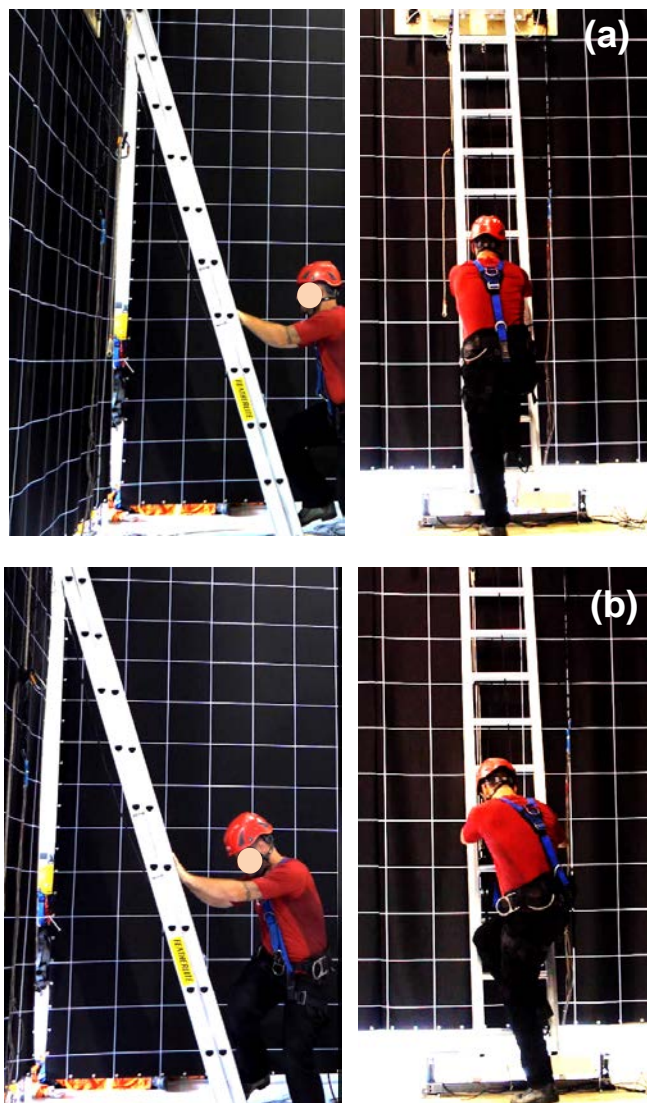


Figure 49. Expérimentateur 1 se hissant sur le premier échelon de l'échelle, installée à $72,5^\circ$, avec la technique de face (a) et de côté (b).

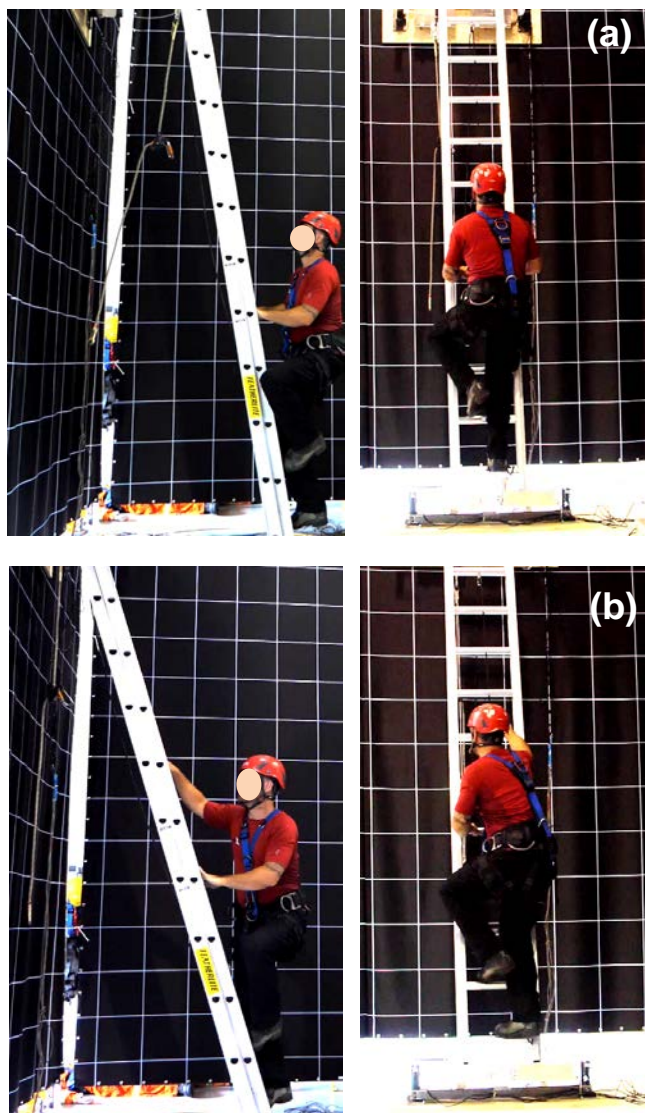


Figure 50. Expérimentateur 1 se hissant sur le deuxième échelon de l'échelle, installée à $72,5^\circ$, avec la technique de face (a) et de côté (b).

La Figure 51 montre que dans le cas de la montée de côté, le CDG avant-arrière est proche de 0 seulement pour le premier échelon de l'échelle. Le risque de basculement arrière est donc présent, mais plutôt limité, car le travailleur est encore proche du sol. Par contre, dans le cas de la montée face à l'échelle, le CDG avant-arrière est proche de 0 pour les trois ou quatre premiers échelons de l'échelle. Lors des essais, E1 n'a pu gravir l'échelle que parce que celle-ci était équipée d'un dispositif de retenue en son sommet, empêchant donc un basculement arrière complet. La Figure 50 (a) montre d'ailleurs que l'angle de l'échelle est bien supérieur à 75° , ce qui indique donc que les montants ne sont plus appuyés sur le mur au sommet de l'échelle, lorsque l'expérimentateur est sur le deuxième échelon. Dans un cas comme dans l'autre, la position du CDG gauche/droite évolue relativement peu et oscille autour de la distance d'équilibre (22 cm environ), ce qui correspond au transfert de masse d'un pied vers l'autre lors de la montée.

Cependant, dans le cas de la montée de côté, au début du graphique, le CDG est un peu plus sur la droite (distance supérieure à 22 cm), ce qui correspond au côté qu'a choisi l'expérimentateur pour rapprocher son bassin de l'échelle (Figure 49 et Figure 50).

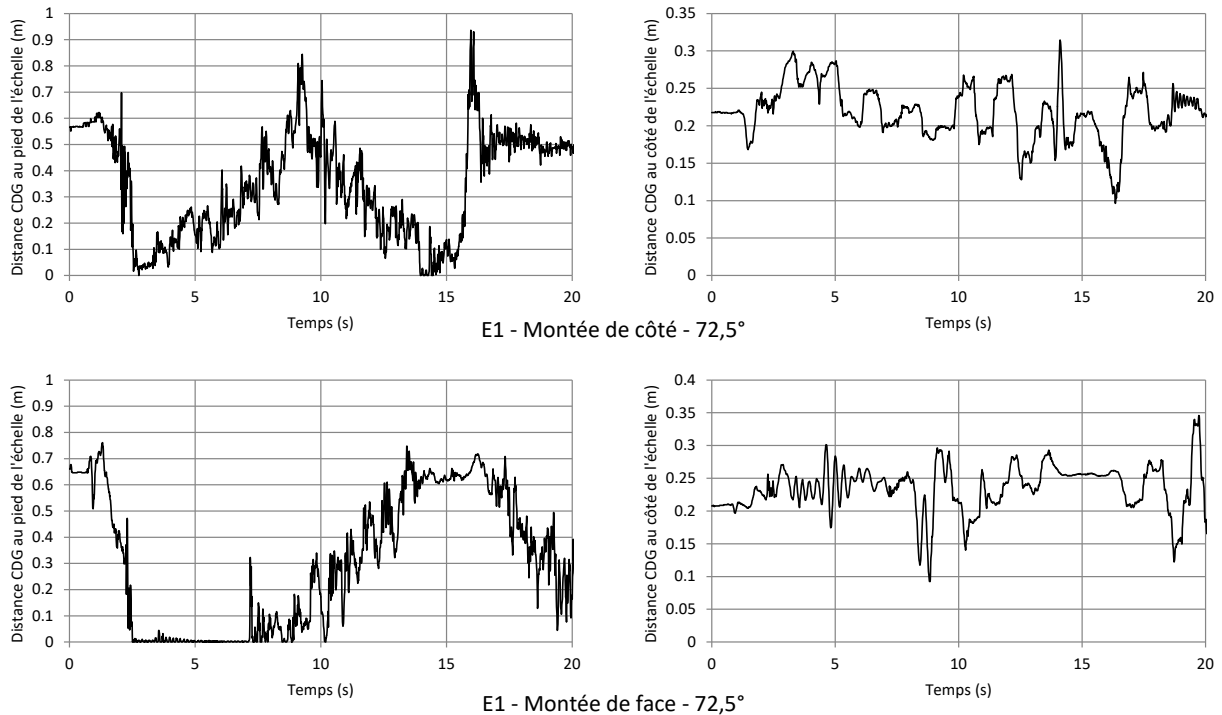


Figure 51. Distance du CDG lors de la montée et de la descente de E1, pour une échelle en aluminium non déployée, installée à 72,5 °.

La Figure 52 présente la position du CDG pour une échelle installée à 75 °, dans le cas de E2, suivant qu'il monte de face ou de côté, et pour une échelle en aluminium et une échelle en fibre de verre. Comme dans le cas de la Figure 51, le risque de basculement arrière est plus faible dans le cas de la montée de côté (distance du CDG différente de 0) que dans le cas de la montée de face sur l'échelle en aluminium (plusieurs secondes où le CDG a une distance de 0). Dans le cas d'une échelle en fibre de verre, même dans le cas d'une montée de face, le risque de basculement arrière est limité. Ceci s'explique par le fait que le poids de l'échelle en fibre de verre est plus élevé que celui de l'échelle en aluminium, ce qui lui donne naturellement une stabilité accrue vis-à-vis des différents modes de basculement et retournement. Dans le cas de l'échelle en fibre de verre, la montée de l'expérimentateur commence à 5 secondes environ. À partir du moment où l'expérimentateur est sur l'échelle, le CDG gauche-droite oscille autour de sa position d'équilibre naturel, soit 22 cm environ.

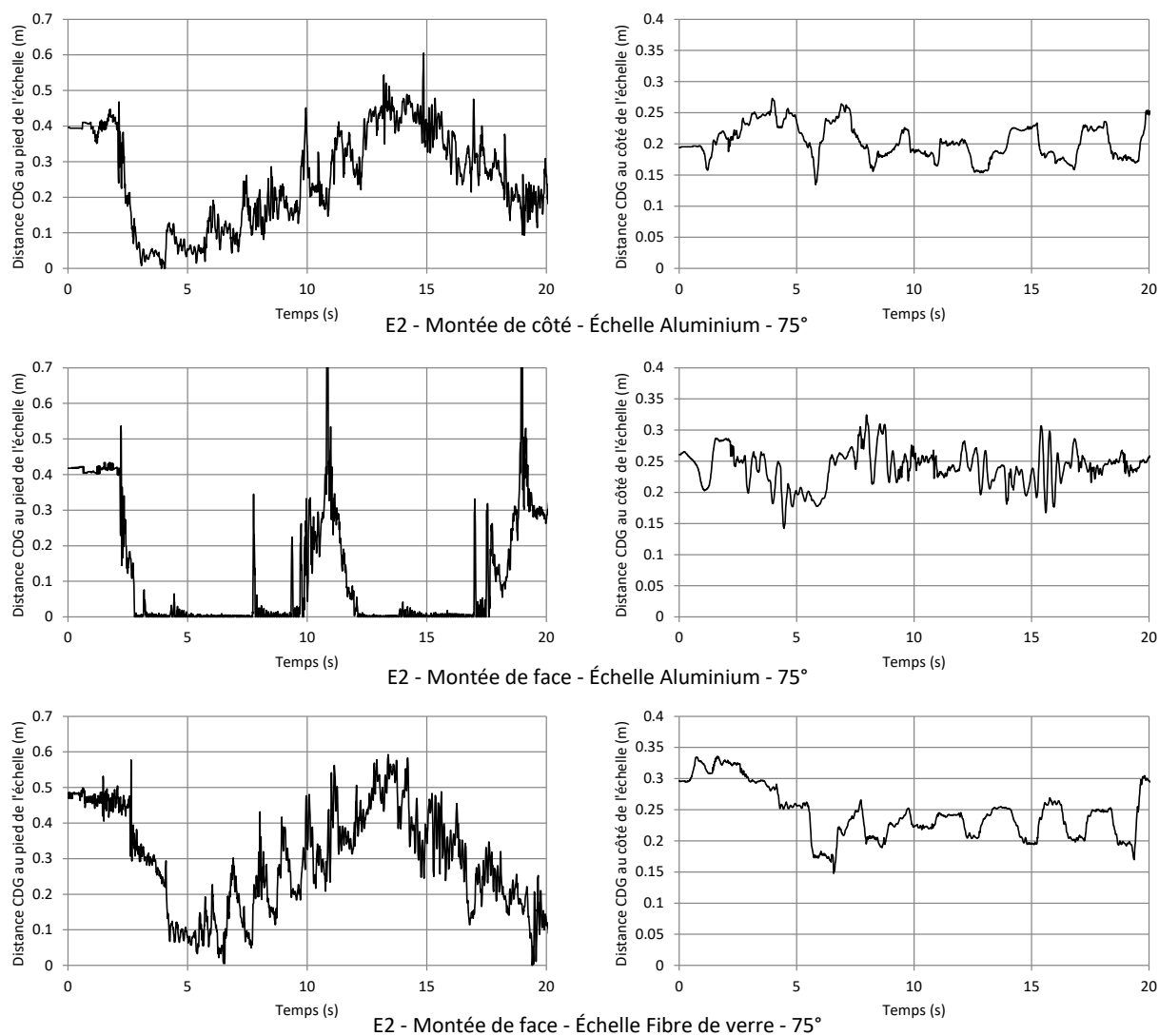


Figure 52. Distance du CDG lors de la montée et de la descente de E2, pour une échelle non déployée, installée à 75 °.

5.2.3 Échelle déployée

La Figure 53 présente les résultats des essais M21-70 (échelle déployée installée à 70 °), réalisés avec E2. Comme dans le cas de l'échelle non déployée, la position du CDG du système échelle-expérimentateur varie linéairement avec la hauteur sur l'échelle pour les positions 1 et 3, alors que dans le cas de la position 2, il semble y avoir une petite augmentation sur les premiers échelons, puis un CDG se trouvant dans l'intervalle 10 à 15 cm du côté gauche de l'échelle (le côté où se penche l'expérimentateur).

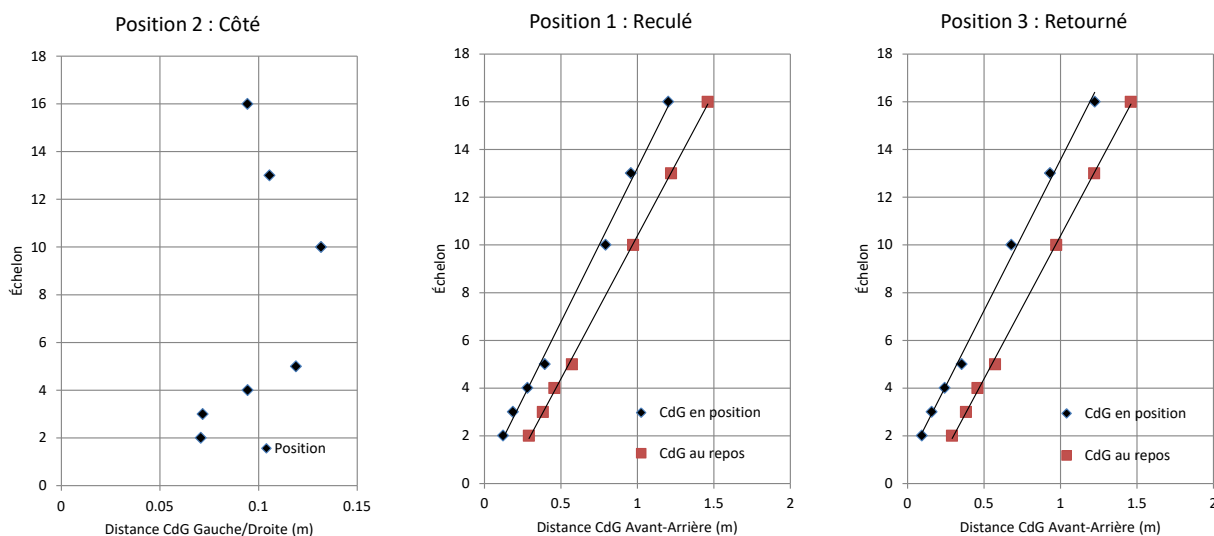


Figure 53. Résultats des essais M21-70 : position du CDG et risque de retournement ou basculement arrière, E2.

5.2.3.1 Influence de la position de l'expérimentateur

La Figure 54 montre, comme dans le cas de l'échelle non déployée, qu'aux erreurs expérimentales près, quel que soit l'angle d'installation de l'échelle, la position 3 (retourné) entraîne un risque d'instabilité plus important que la position 1 (reculé).

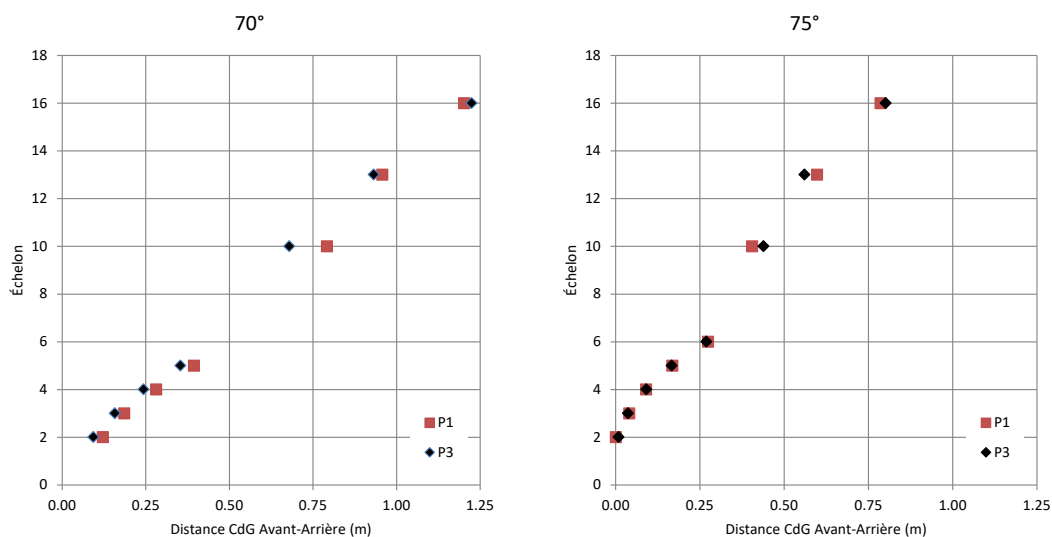


Figure 54. Comparaison des distances au CDG échelle-expérimentateur pour les positions reculé et retourné.

5.2.3.2 Influence de l'angle

La Figure 55 montre que, comme dans le cas de l'échelle non déployée, plus l'angle de l'échelle est important, plus le risque de basculement arrière est important. Le risque de retournement ou glissement sur le côté est similaire pour les angles de 70 ° et 75 °.

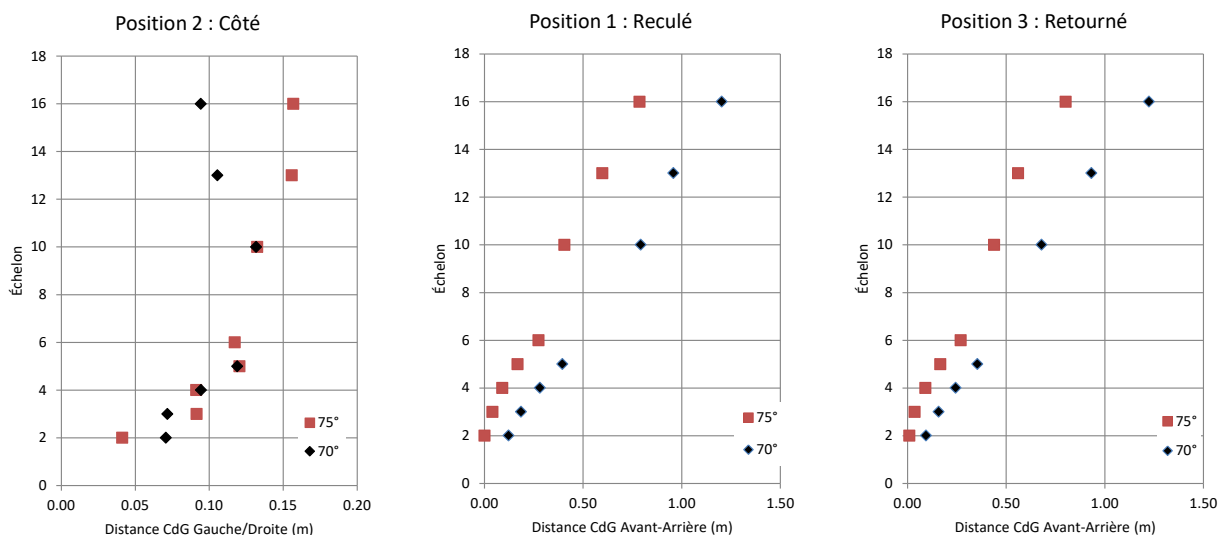


Figure 55. Comparaison des distances au CDG échelle-expérimentateur 2 pour une échelle en aluminium déployée installée à différents angles.

5.2.3.3 Influence du poids de l'expérimentateur

La Figure 56 montre la position du CDG du système expérimentateur-échelle, pour l'expérimentateur 2, qu'il porte une veste lestée (E2+WV) ou non (E2), dans le cas d'une échelle en aluminium installée à un angle de 75 °, et la Figure 57 dans le cas d'un angle de 70 °.

Dans le cas de E2+WV, les résultats sont un peu moins tranchés que dans le cas de l'échelle non déployée (section 5.2.2.3). En effet, le nombre de répétitions a été conservé à 1 dans le cas de l'échelle déployée, pour des raisons de temps, ainsi la variabilité des observations est plus grande, et non compensée par une moyenne sur trois essais. La tendance observée est cependant similaire : E2+WV présente un risque d'instabilité légèrement plus important sur les échelons du bas de l'échelle (2 à 5) pour les positions P1 et P3, car son CDG corporel est situé en arrière du CDG de l'échelle, ce qui a tendance à diminuer la distance du CDG du système expérimentateur-échelle et donc à augmenter le risque d'instabilité. Au-delà du sixième échelon, par rapport à E2, E2+WV présente un risque de basculement arrière plus faible, car la position physique de son CDG est la même que pour E2, mais son poids est plus important, ainsi, la stabilité du système échelle-expérimentateur est accrue.

Pour la P2, la présence des mousquetons portés à la ceinture (un peu en dessous du CDG naturel de l'expérimentateur) semble avoir une influence sur les résultats : les mousquetons vont être moins déportés sur le côté, et donc la distance observée pour la position du CDG est plus élevée par rapport au côté de l'échelle.

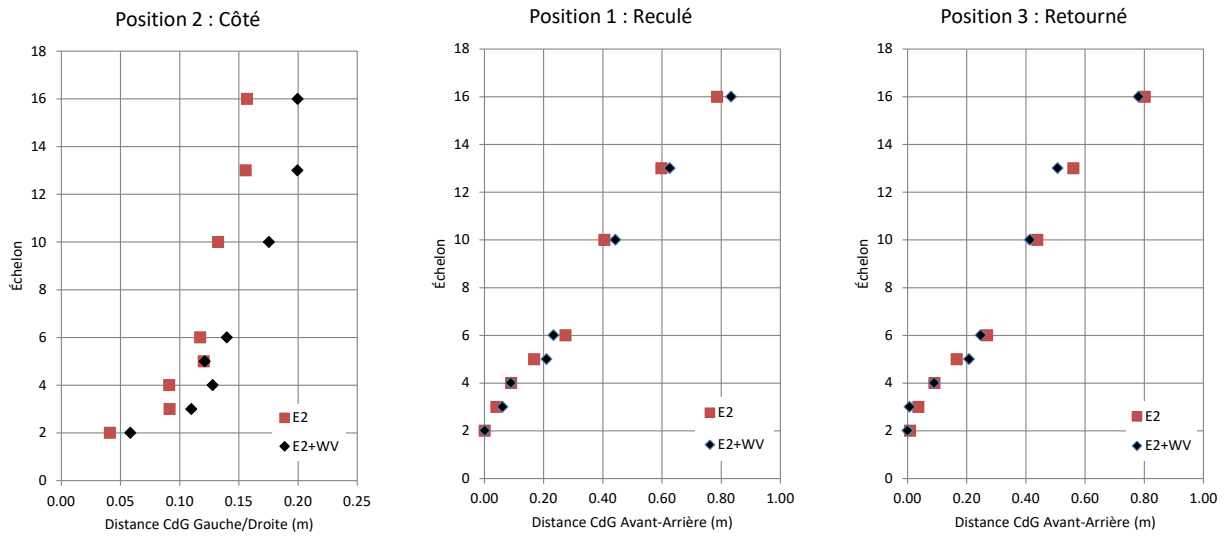


Figure 56. Comparaison des distances au CDG échelle-expérimentateur pour une échelle en aluminium déployée installée à 75 °.

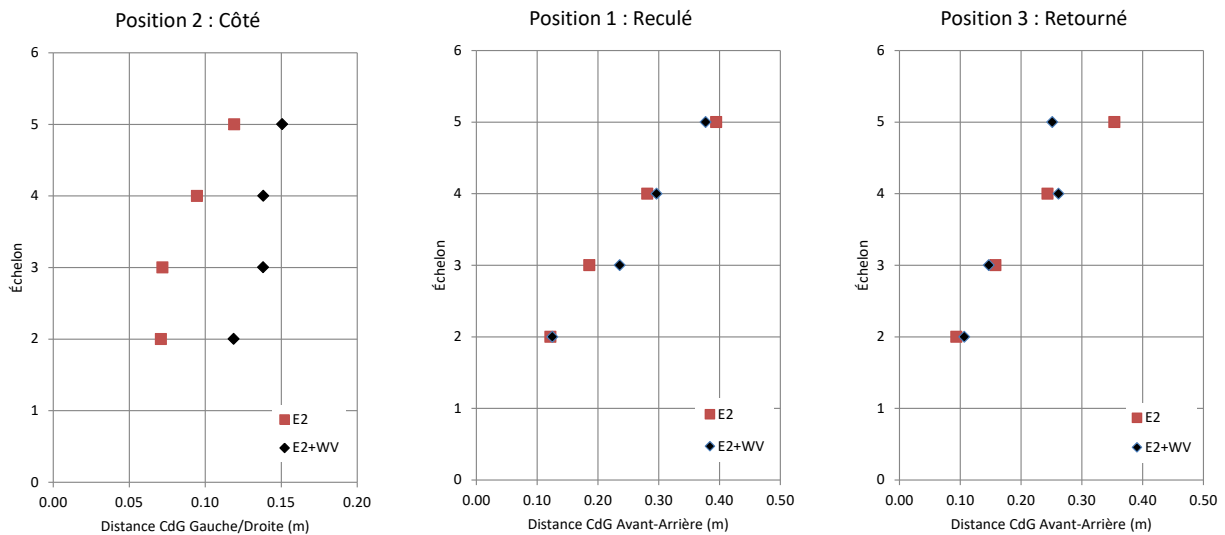


Figure 57. Comparaison des distances au CDG échelle-expérimentateur pour une échelle en aluminium déployée installée à 70 °.

5.2.3.4 Influence du type d'échelle

La Figure 58 montre que, comme dans le cas de l'échelle non déployée, le risque d'instabilité est moins présent pour une échelle en fibre de verre que pour une échelle en aluminium : le poids plus élevé de l'échelle en fibre de verre augmente la stabilité du système. Ceci est d'autant plus marqué que le poids de l'utilisateur de l'échelle est faible. Pour un travailleur très lourd, l'écart observé serait très certainement moins important.

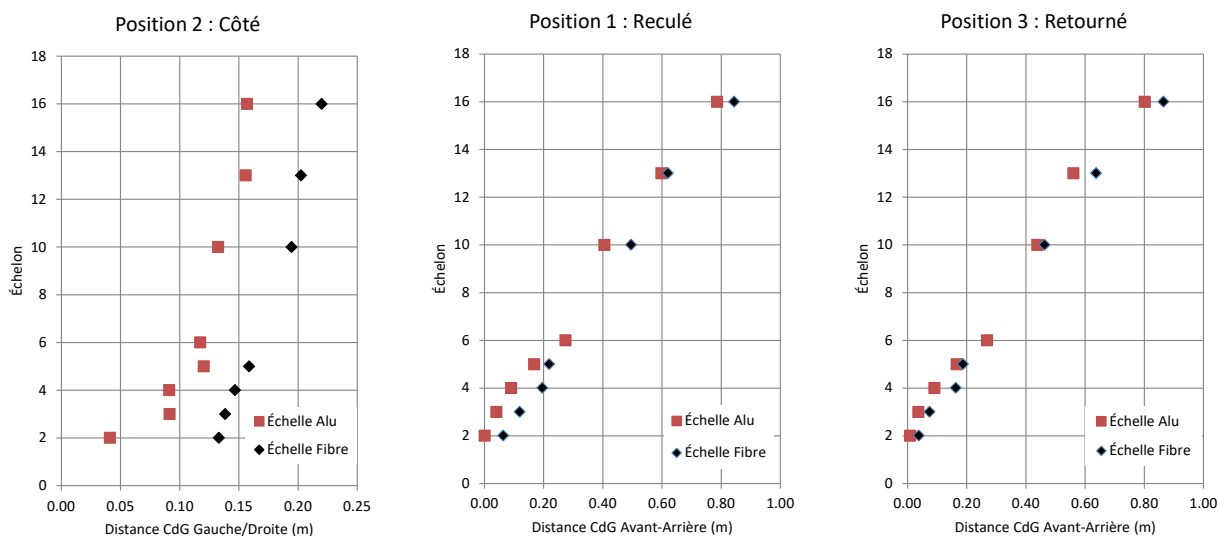


Figure 58. Comparaison des distances au CDG échelle-expérimentateur 2 pour une échelle en aluminium ou en fibre de verre, déployée, installée à 75 °.

5.2.3.5 Montée de l'échelle

La Figure 59 montre la position des CDG avant-arrière et gauche-droite lors de la montée de l'échelle déployée, installée à un angle de 70 °, pour les expérimentateurs E1, E2, et E2+WV. Les tendances observées sont similaires à celles notées dans le cas de l'échelle déployée : plus le travailleur est haut sur l'échelle, plus la distance entre le CDG du système échelle-expérimentateur va être importante, signifiant une stabilité accrue. Dans le cas de l'échelle déployée à un angle de 70 °, il n'y a pas de risque de basculement arrière significatif excepté pour l'échelon 1, dans le cas de E1, alors que la technique utilisée est la montée de face, soit la technique offrant un risque de basculement arrière accru. Concernant la position du CDG gauche-droite, lors des montées, sa position oscille autour de la position d'équilibre, soit environ 22 cm. Néanmoins, dans le cas de E2 et E2+WV, pour les échelons du bas, la position d'équilibre du CDG oscille plutôt autour de valeurs comprises entre 15 et 20 cm, ce qui signifie que E2 s'est légèrement déporté sur le côté gauche de l'échelle.

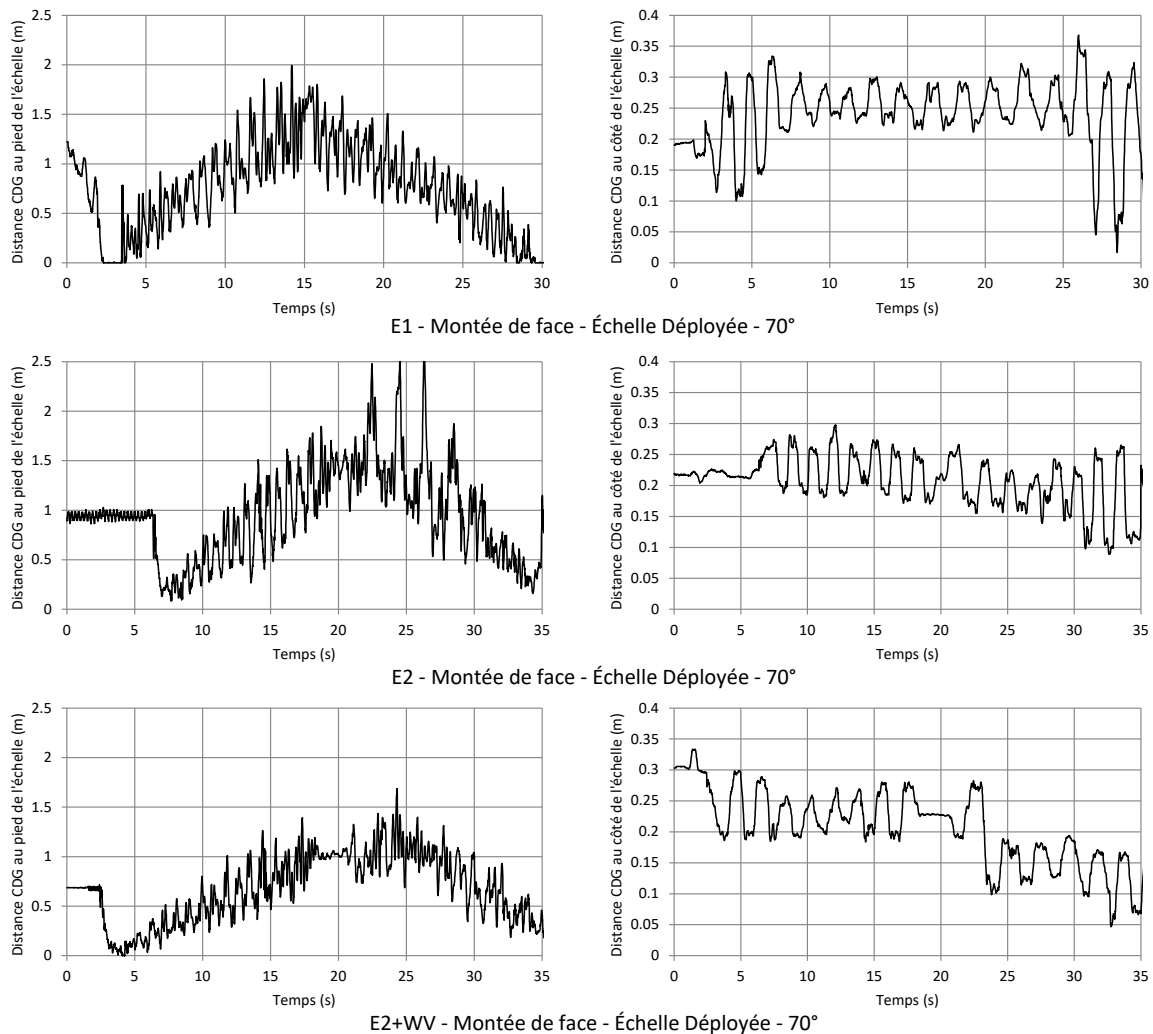


Figure 59. Distance du CDG lors de la montée et de la descente pour une échelle déployée, installée à 70°.

5.3 Essais de stabilité sur les escabeaux

5.3.1 Interprétation des forces mesurées aux pieds de l'escabeau

La Figure 60 présente l'évolution temporelle des forces verticales mesurées à chacun des pieds de l'escabeau de 12 pieds de haut. Au départ, avant que E1 ne se mette en position P1, les forces verticales mesurées aux pieds arrière de l'escabeau (R_{1Z} et R_{2Z}) sont nettement plus élevées qu'aux pieds avant (R_{3Z} et R_{4Z}) : de l'ordre de 400 N par pied à l'arrière, contre 150 à 200 N par pied à l'avant. Ceci correspond au fait que l'expérimentateur monte sur l'escabeau du côté des pieds arrière. Dans le cas de la position P1, il y a une augmentation des forces verticales sur les deux pieds arrière et une diminution sur les deux pieds avant. Pour la position P2, les forces diminuent pour les pieds R_{2Z} et R_{4Z} (côté droit) et augmentent pour les pieds R_{1Z} et R_{3Z} (côté gauche), ce qui correspond au cas où l'expérimentateur se penche sur le côté gauche de l'escabeau. Finalement, pour la position P3, la tendance est similaire à la position P1, mais avec une diminution plus marquée de la force verticale pour les pieds avant de l'escabeau.

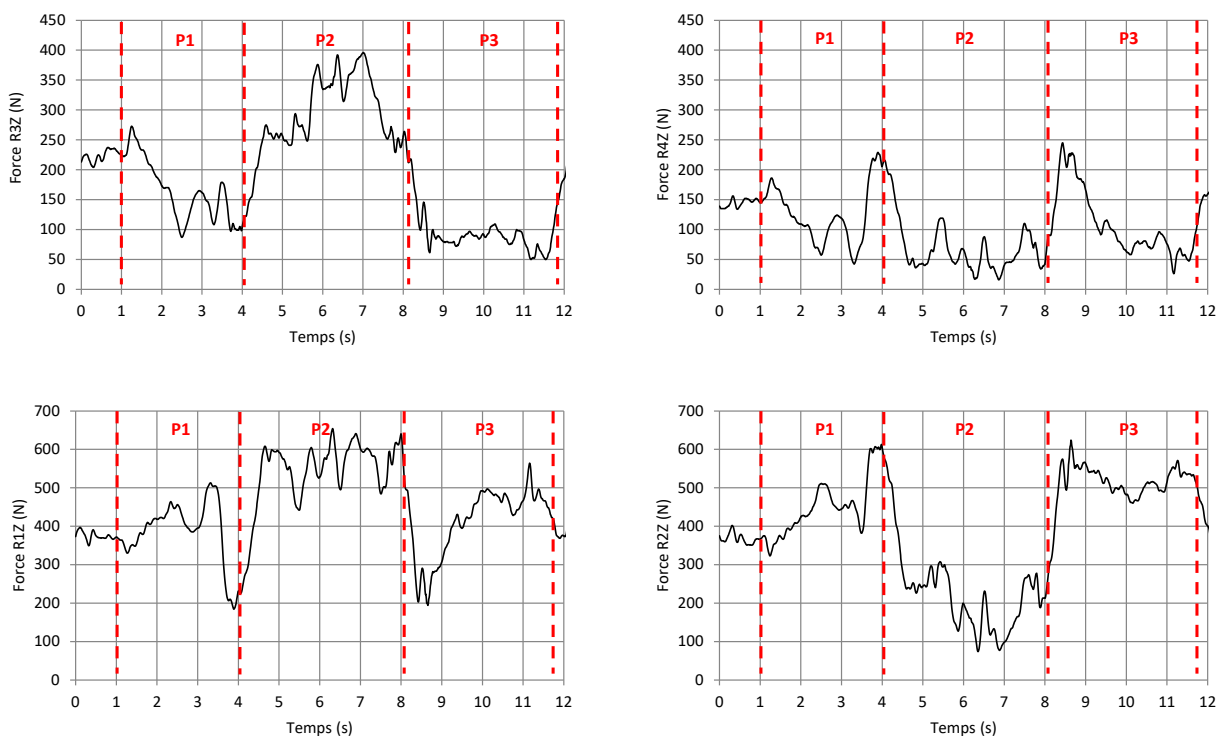


Figure 60. Résultat de l’essai ESC12-5-E1-SD-3 – Forces verticales mesurées sur chacun des pieds de l’escabeau.

La méthode d’estimation de la position des CDG est présentée en Annexe A. La Figure 61 présente la position des CDG avant-arrière et gauche-droite pour le système escabeau-expérimentateur. Dans le cas des positions P1 et P3, il y a une diminution de la distance entre les pieds arrière et la position du CDG avant-arrière, néanmoins cette distance reste relativement élevée, signalant que le risque de basculement arrière est faible. Dans le cas de la position P2, la distance du CDG avant-arrière reste à peu près équivalente à la position de départ, au repos. Pour ce qui est du CDG gauche-droite, les positions P1 et P3 n’ont pas d’influence significative, et le CDG reste à environ 40 cm du montant gauche de l’escabeau, ce qui correspond environ à la moitié de la distance entre les montants (404,5 mm).

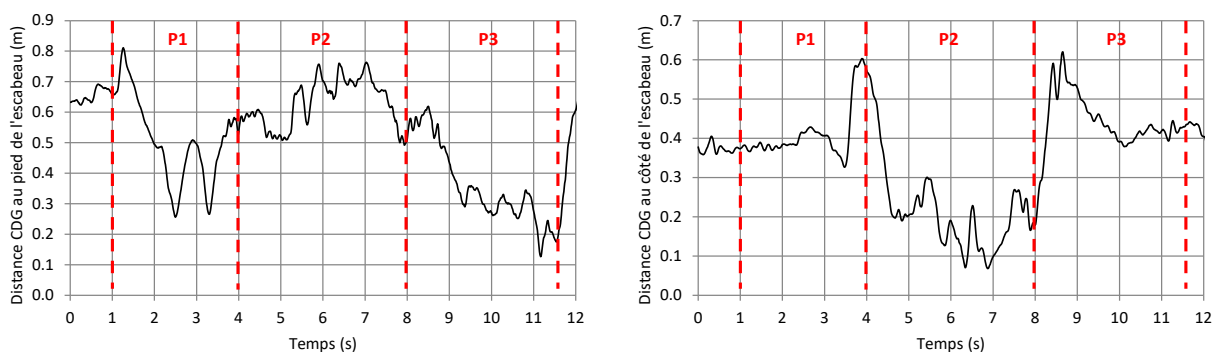


Figure 61. Résultat de l’essai ESC12-5-E1-SD-3 – Position du CDG calculée.

5.3.2 Escabeau de 6 pieds

La Figure 62 présente la position du CDG du système escabeau-expérimentateur (E2) pour les trois positions adoptées successivement lors de la séquence de mouvement présentée en section 4.2.1. Lorsque la distance entre le CDG et le côté gauche ou l'arrière de l'échelle est nulle, cela signifie que le système est instable, et qu'un risque d'instabilité existe lorsque cette distance est proche de zéro. La position du CDG avant-arrière au repos a tendance à s'éloigner du pied de l'échelle lorsque l'on monte sur l'escabeau, et ce constat est également valable pour les positions 1 et 3 : plus on est haut sur l'escabeau, plus le risque de basculement arrière diminue. Dans le cas de la position 2, les résultats des essais ESC6 indiquent que la position du CDG gauche-droite est toujours nulle, ce qui indique une instabilité et un risque de basculement sur le côté.

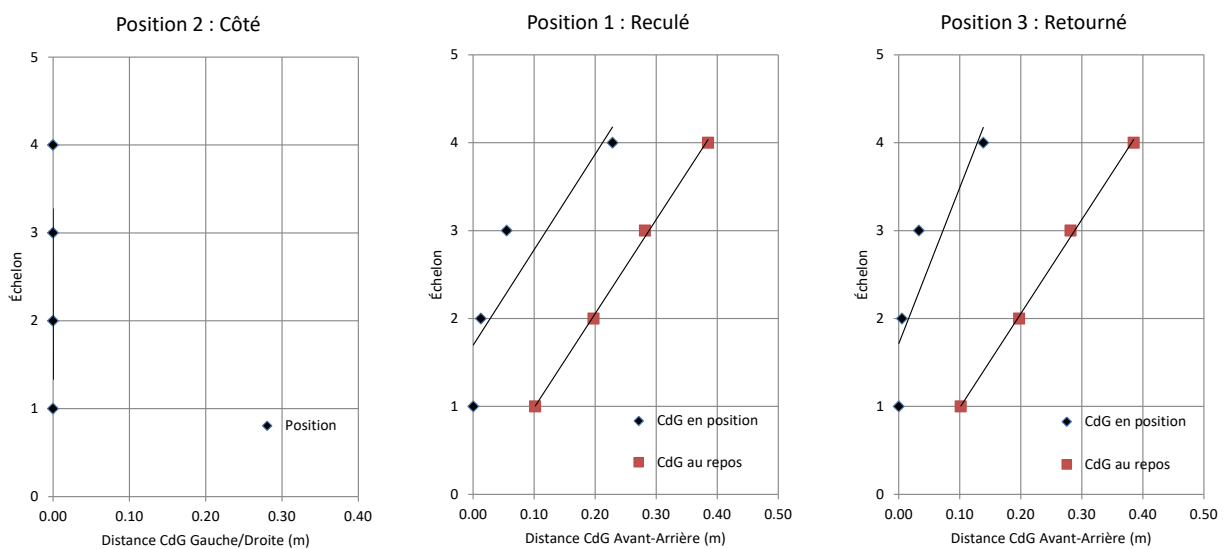


Figure 62. Résultats des essais ESC6 : position du CDG et risque de retournement ou basculement arrière.

La Figure 63 présente une comparaison de la position du CDG avant-arrière pour les positions 1 et 3. Comme observé pour le cas des échelles, déployées ou non, la position P3 présente un risque d'instabilité plus élevé (distance du CDG aux pieds arrière de l'escabeau plus faible). Il y a un risque élevé de basculement arrière pour les positions P1 et P3, jusqu'à l'échelon 3. Le Tableau 17 résume les risques d'instabilité pour l'escabeau de 6 pieds de haut.

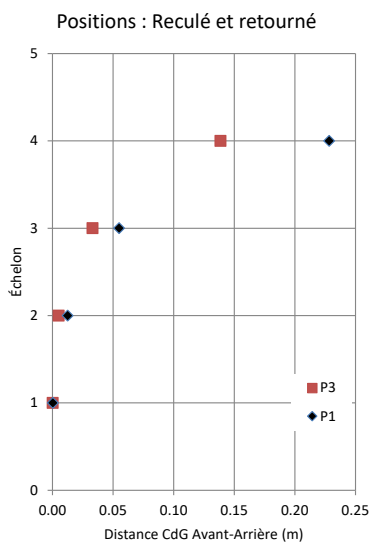


Figure 63. Comparaison des distances au CDG escabeau-expérimentateur pour les positions reculé et retourné.

Tableau 17. Risque d’instabilité en fonction de la position

Échelon	P2	P1	P3
1	X	X	X
2	X	X	X
3	X	X	X
4	X		

5.3.3 Escabeau de 12 pieds

La Figure 64 présente la position du CDG du système escabeau-expérimentateur (E1) pour les trois positions adoptées successivement lors de la séquence de mouvement présentée en section 4.2.1. Lorsque la distance entre le CDG et le côté gauche ou l’arrière de l’échelle est nulle, cela signifie que le système est instable, et qu’un risque d’instabilité existe lorsque cette distance est proche de zéro. La position du CDG avant-arrière au repos a tendance à s’éloigner du pied de l’échelle lorsque l’on monte sur l’escabeau, et ce constat est également valable pour les positions 1 et 3 : plus on est haut sur l’escabeau, plus le risque de basculement arrière diminue. Dans le cas de la position 2, les résultats des essais ESC12 indiquent que la position du CDG gauche-droite s’éloigne du montant à mesure que l’expérimentateur est plus haut sur l’escabeau. Ceci s’explique par la forme de l’escabeau de 12 pieds : la largeur de la base est environ le double de celle au sommet. Ainsi, l’expérimentateur pouvait se décaler plus sur le côté gauche afin de se mettre en position 2 pour les échelons inférieurs, alors que pour les échelons supérieurs il était naturellement ramené vers le centre de l’escabeau.

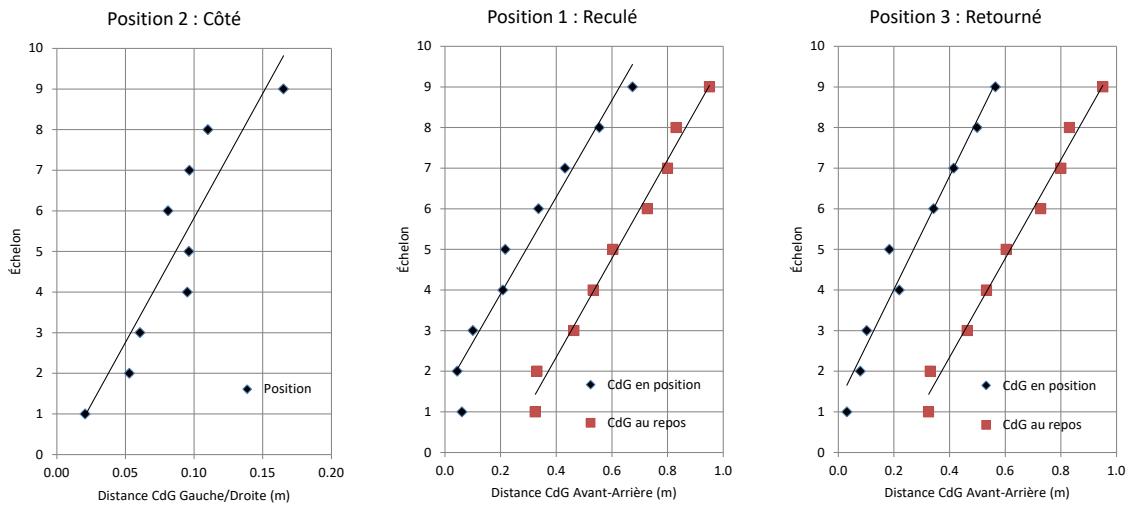


Figure 64. Résultats des essais ESC12 : position du CDG et risque de retournement ou basculement arrière.

La Figure 65 présente une comparaison de la position du CDG avant-arrière pour les positions 1 et 3. Comme observé pour le cas de l'escabeau de 6 pieds, la position P3 présente un risque d'instabilité plus élevé (distance du CDG aux pieds arrière de l'escabeau plus faible). Il y a un risque élevé de basculement arrière pour les positions P1 et P3, seulement pour l'échelon 1. Le Tableau 19 résume les risques d'instabilité pour l'escabeau de 12 pieds de haut. Aucun des essais effectués n'a amené à une instabilité. Si l'escabeau de 6 pieds présente un risque d'instabilité jusqu'au 3e échelon (avec E2), il est à noter que ce risque est réduit dans le cas de l'escabeau de 12 pieds (avec une instabilité détectée uniquement pour le 1er échelon, avec E1). Ceci peut être attribué à la masse plus élevée de l'escabeau de 12 pieds, ainsi qu'à un CDG plus éloigné des pieds, favorisant une plus grande stabilité.

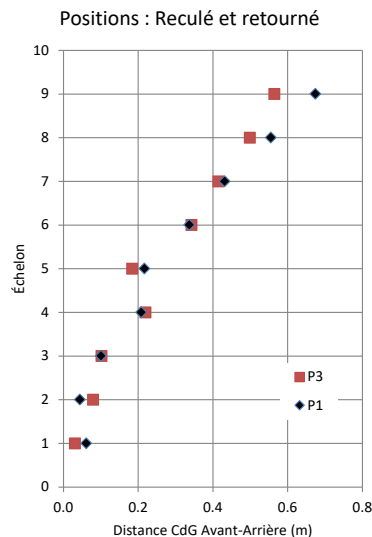


Figure 65. Comparaison des distances au CDG escabeau-expérimentateur pour les positions reculé et retourné.

Tableau 18. Risque d'instabilité en fonction de la position

Échelon	P2	P1	P3
1	X	X	X
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			

Contrairement à ce qui pourrait être anticipé par des travailleurs, les escabeaux de plus grandes dimensions seront plus stables que les escabeaux de petites dimensions, qui sont pourtant très couramment employés, aussi bien dans le milieu de la construction qu'en établissement. Une chute d'un escabeau de 6 pieds, même de faible hauteur, pourrait cependant entraîner des blessures pour le travailleur, ainsi qu'un arrêt de travail de plusieurs jours.

6. MODÈLE ANALYTIQUE

Afin de généraliser les résultats expérimentaux présentés au chapitre 5, des modèles analytiques ont été développés afin d'étudier l'influence du poids et de la taille du travailleur, ainsi que celle du poids de l'échelle ou de l'escabeau. Les diverses hypothèses et les équations analytiques utilisées pour chacune de ces hypothèses sont présentées en Annexe B. La dérivation des équations pour les modèles analytiques est également détaillée en Annexe B. Dans un premier temps, une comparaison des résultats expérimentaux à ceux issus des modèles analytiques est présentée, et certains paramètres ont été ajustés afin d'affiner les modèles analytiques par rétro calcul.

6.1 Comparaison des résultats théoriques et expérimentaux pour les échelles

6.1.1 Échelle seule

Le Tableau 19 présente une comparaison de la position du CDG de l'échelle calculée selon la méthode analytique ou estimée d'après les valeurs expérimentales mesurées.

Tableau 19. Position du CDG de l'échelle selon les méthodes analytique et expérimentale

Position CDG	Échelle 24'' non déployée			Échelle 24'' déployée	
	70 °	72,5 °	75 °	70 °	75 °
Analytique (m)	0,626	0,550	0,474	1,112	0,841
Expérimental (m)	0,581	0,482	0,485	1,055	0,772
	0,692	0,566	0,402	1,135	0,793
	-	0,644	0,406	0,985	0,822
	-	0,533	0,425	-	-
Moyenne (m)	0,637	0,556	0,430	1,058	0,796
Écart moyen (m)	-0,011	-0,006	0,044	0,054	0,045
Écart moyen (%)	-1,7 %	-1,1 %	9,4 %	4,8 %	5,4 %

L'écart observé varie de -1,7 % à 9,4 %, soit de -1,1 cm à + 5,4 cm en valeur numérique. Pour des angles compris entre 69,5 ° et 75,5 °, une erreur de positionnement de 0,5 ° se traduit par un écart en pied de 3 cm pour l'échelle non déployée, et donc une erreur de 1,5 cm sur la distance du CDG estimé analytiquement par rapport à la mesure. Dans le cas de l'échelle déployée, une erreur de positionnement de 0,5 ° se traduit par un écart en pied de 5,5 cm et donc une erreur de 2,8 cm sur la distance du CDG estimé analytiquement par rapport à la mesure. Une autre source d'erreur est la présence, en pied d'échelle lorsque celle-ci est non déployée, du dispositif permettant de fixer les deux parties coulissantes de l'échelle. Ainsi, le poids n'est pas uniformément réparti, et l'hypothèse (simplificatrice) de départ n'est pas complètement respectée.

Considérant la petite erreur de positionnement qui peut survenir (ou le déplacement léger de l'échelle d'un essai à l'autre) et l'erreur de mesure, les écarts observés entre la position du CDG de l'échelle selon la méthode analytique et l'estimation basée sur les mesures expérimentales sont acceptables.

6.1.2 Expérimentateur au repos

La comparaison est d'abord faite en utilisant l'équation (39) et donc l'hypothèse H1 (Figure 66).

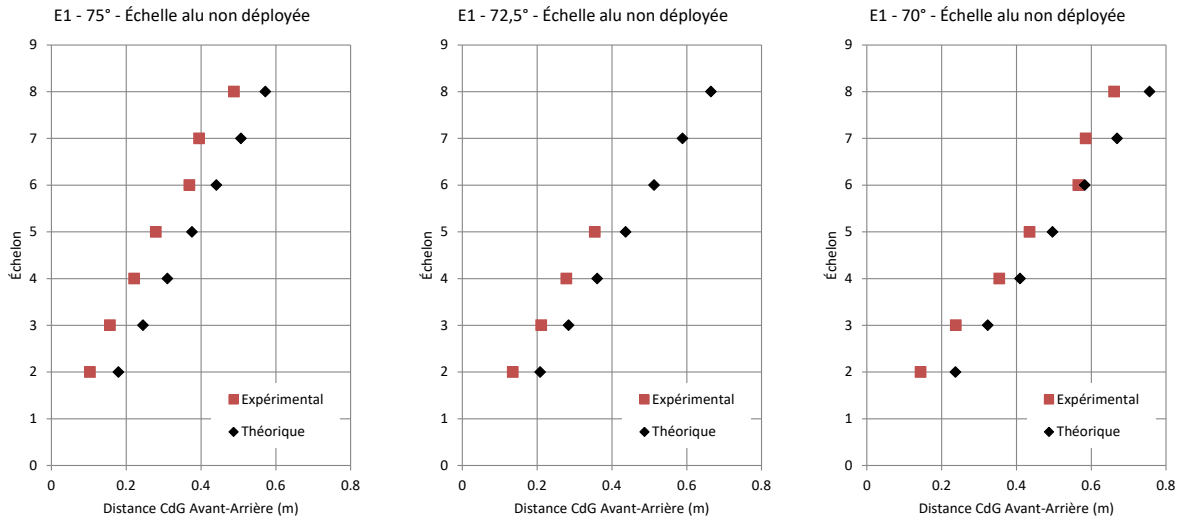


Figure 66. Comparaison des valeurs expérimentales et théoriques, pour E1 avec H1.

Comme attendu, il y a un écart entre la position calculée analytiquement pour le CDG avant-arrière et la valeur mesurée expérimentalement. Ceci est dû au fait que l'expérimentateur n'est pas parfaitement vertical sur l'échelon.

La comparaison est ensuite faite en utilisant l'équation (47), en considérant une légère inclinaison pour la position au repos (5°), aussi bien pour l'expérimentateur E1 (Figure 67) que l'expérimentateur E2 (Figure 68).

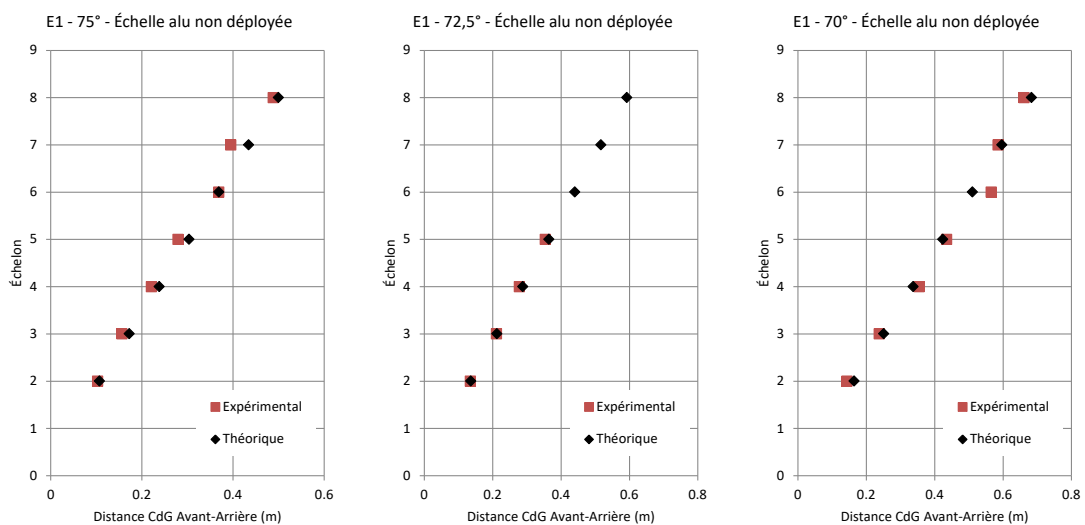


Figure 67. Comparaison des valeurs expérimentales et théoriques, dans le cas d'une inclinaison au repos de 5° , pour E1.

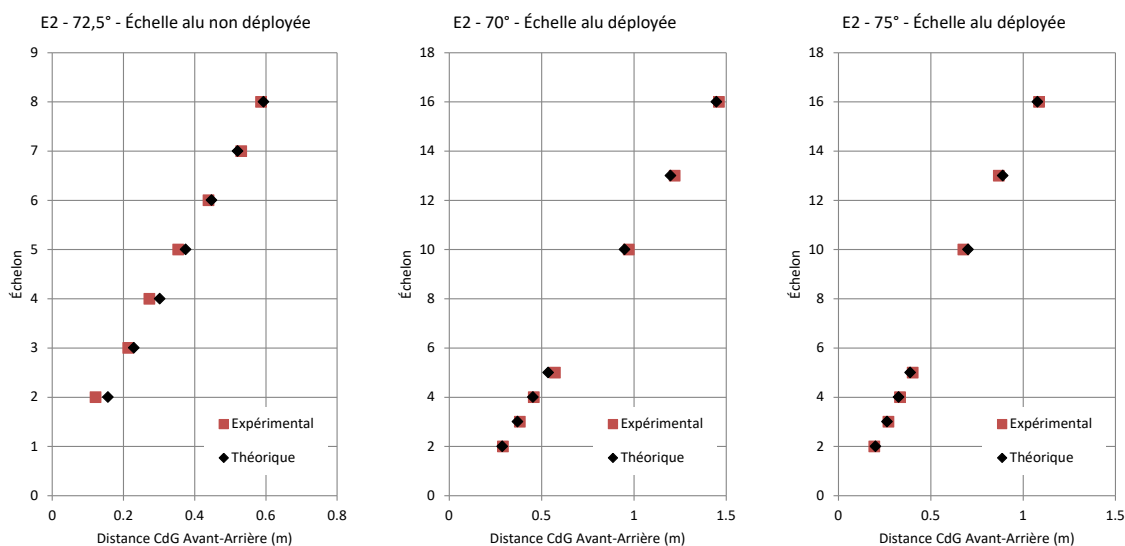


Figure 68. Comparaison des valeurs expérimentales et théoriques, dans le cas d'une inclinaison au repos de 5°, pour E2.

Dans le cas de l'échelle déployée, les écarts constatés avec les valeurs expérimentales vont de -7 à +2,5 cm, dans le cas de l'échelle non déployée, les écarts sont de -9 à +2,5 cm. Les écarts les plus grands sont observés pour les échelons les plus hauts en général. Les écarts moyens observés pour chaque configuration sont de l'ordre de 1 à 3 cm. Considérant l'hypothèse simplificatrice H2 et les variations expérimentales, le modèle théorique proposé donne des résultats satisfaisants, et permettra d'étudier une plage de tailles et de poids différents pour les travailleurs.

6.1.3 Expérimentateur dans la position P1

La comparaison est faite en utilisant l'équation (47), en considérant inclinaison de 16° pour le travailleur dans un premier temps (Figure 69), tel qu'estimé à l'aide des photos prises lors des essais. Les écarts sont significatifs entre les résultats expérimentaux et analytiques. L'angle du travailleur a été ajusté à la baisse dans le modèle analytique afin que les résultats expérimentaux et analytiques soient similaires.

La valeur de l'angle β est ajustée à la hausse par rapport à celui estimé à l'aide de la photo, comme dans le cas du travailleur au repos. Un angle de 21° donne de bons résultats pour une échelle installée à un angle compris entre 75° et 70° (Figure 70).

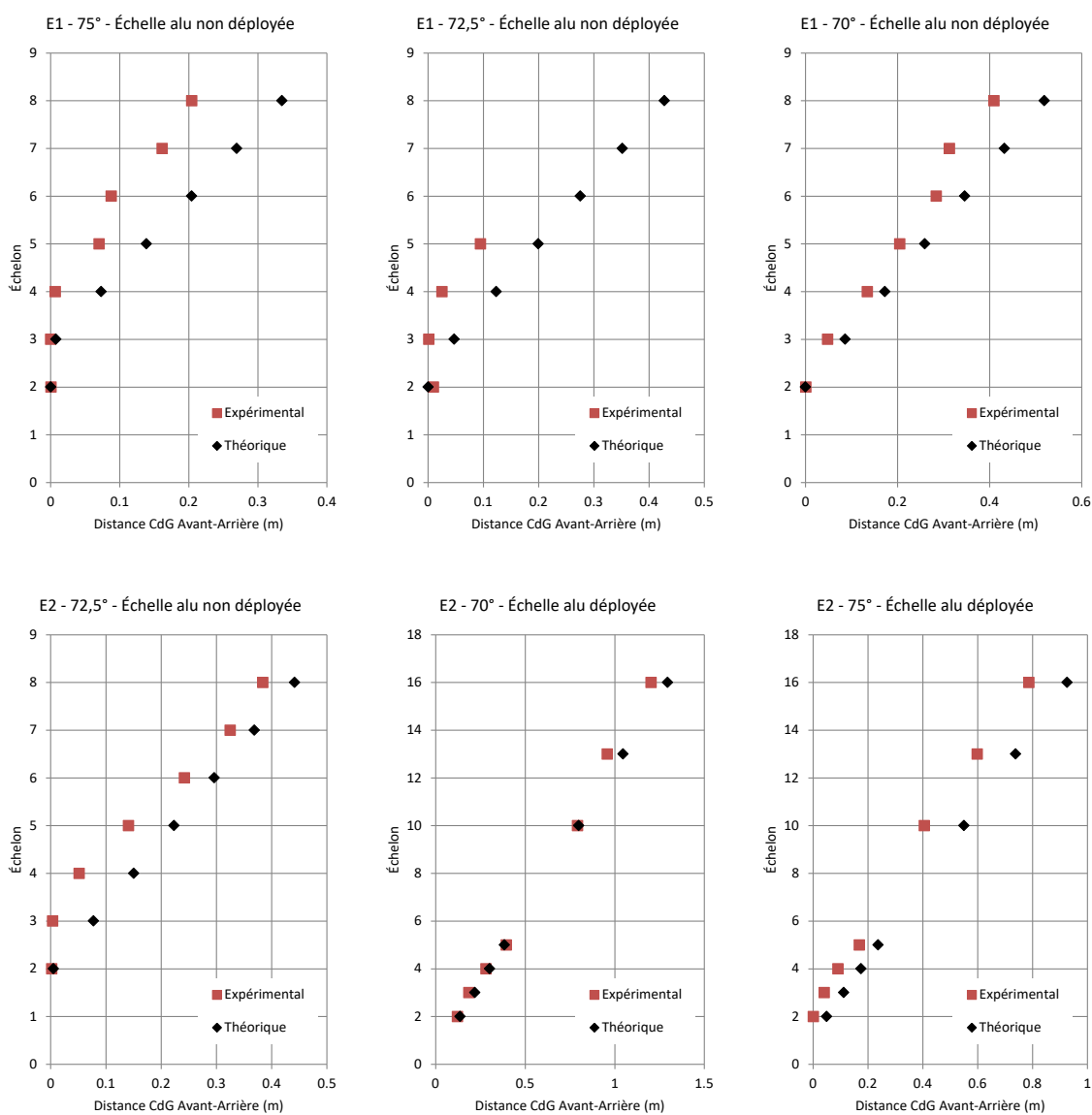


Figure 69. Comparaison des valeurs expérimentales et théoriques pour la position P1, pour un angle β de 16°.

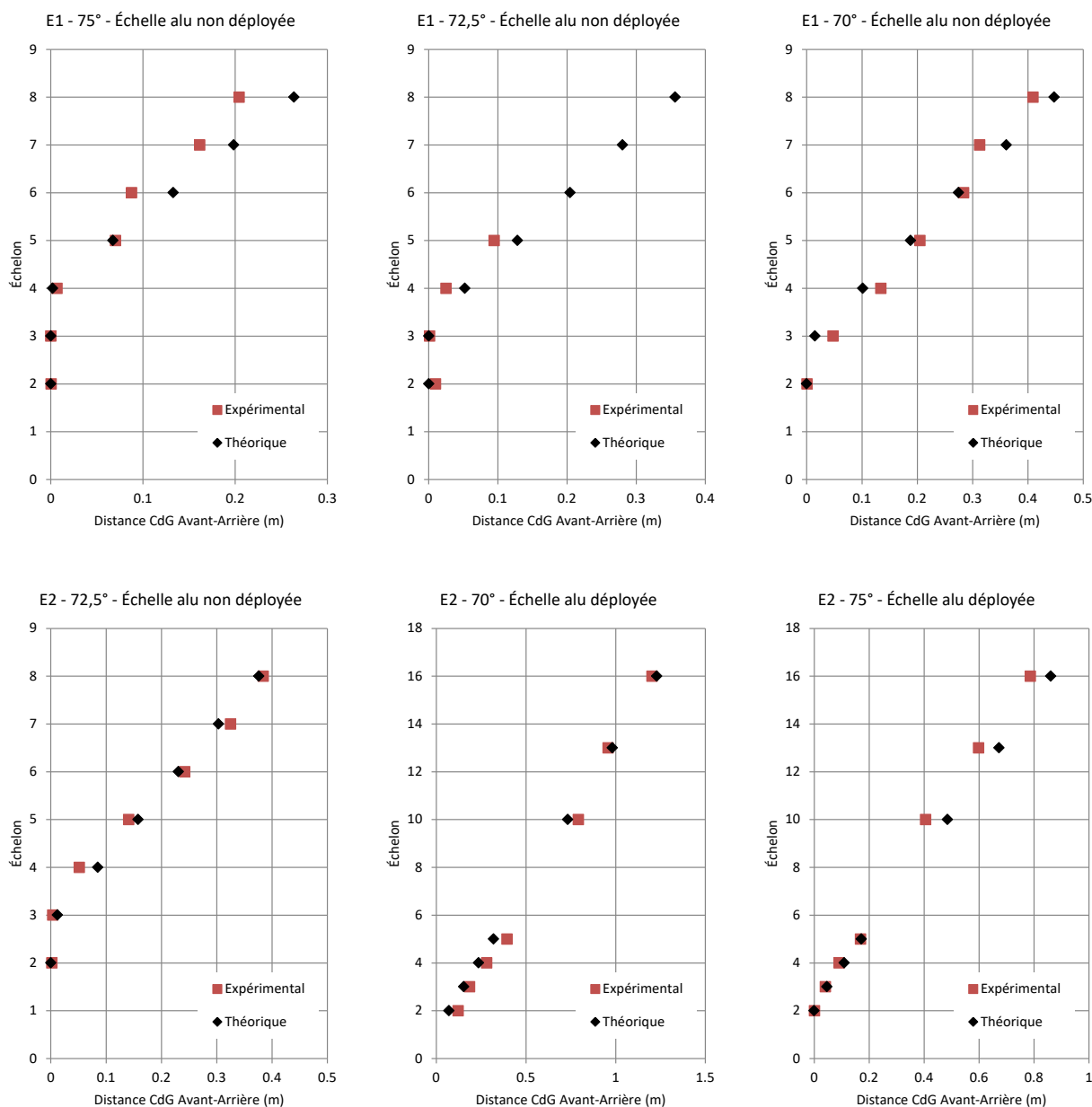


Figure 70. Comparaison des valeurs expérimentales et théoriques pour la position P1, pour un angle β de 21 °.

6.1.4 Expérimentateur dans la position P3

La comparaison est faite en utilisant l'équation (47), en considérant inclinaison de 25 ° pour le travailleur, soit une valeur supérieure au 12 ° estimé à l'aide des photos prises lors des essais (Figure 71). La valeur de l'angle β est supérieure à celle estimée sur les photos comme dans le cas de la position au repos et la position P1, et la différence est plus importante ici compte tenu du fait que l'expérimentateur étend complètement un bras vers l'arrière.

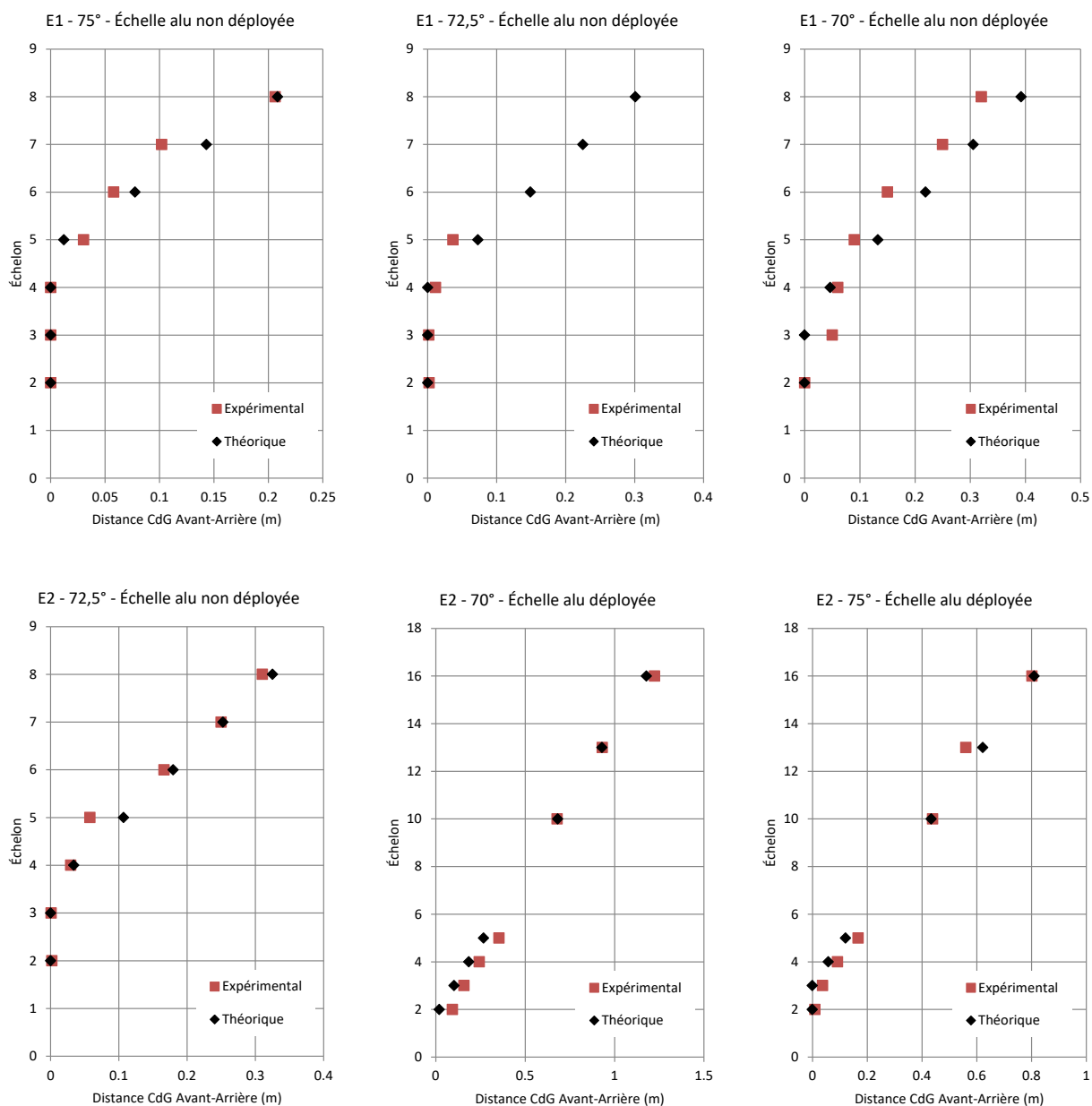


Figure 71. Comparaison des valeurs expérimentales et théoriques pour la position P3, pour un angle β de 25°.

6.2 Comparaison des résultats théoriques et expérimentaux pour les escabeaux

6.2.1 Escabeau seul

Le Tableau 20 présente une comparaison de la position des $CDG_{gch-dte}$ et $CDG_{avt-arr}$ calculée avec la méthode analytique et estimée à partir des valeurs expérimentales.

Tableau 20. Position des CDGs des escabeaux selon les méthodes analytique et expérimentale

Escabeau	R _{1z} (N)	R _{2z} (N)	R _{3z} (N)	R _{4z} (N)	CDG _{gch-dte} (m)	CDG _{gch-dte} analytique (m)	CDG _{av-arr} (m)	CDG _{av-arr} analytique (m)
ESC 6	5	39	36	0	0,267	0,274	0,489	0,543
ESC 12	28	77	72	21	0,401	0,405	0,927	0,988

L'écart observé pour le $CDG_{gch-dte}$ est de 7 mm pour l'ESC6 et 4 mm pour l'ESC12, soit respectivement 2,6 % et 1 %. L'écart observé pour le CDG_{av-arr} est de 54 mm pour l'ESC 6 et 4 mm pour l'ESC12, soit respectivement 10 % et 6 %. Comme mentionné en Annexe B.III.I, un écart était attendu pour le CDG_{av-arr} , du fait que les échelons ne sont pas répartis également de part et d'autre de l'escabeau, donc le CDG_{av-arr} réel n'est pas exactement situé à mi-chemin entre les appuis. Néanmoins, considérant l'erreur de mesure, les écarts observés sont tout à fait acceptables.

6.2.2 Expérimentateur au repos

La Figure 72 présente une comparaison de la position du CDG_{av-arr} dans le cas d'un expérimentateur au repos sur les escabeaux de 12 pieds et de 6 pieds. Dans le cas de l'escabeau de 12 pieds, un angle de -6° a été utilisé pour E1, et un angle de 0° pour E2 dans le cas de l'escabeau de 6 pieds (équation 64). Les valeurs théoriques et expérimentales se comparent bien, et donc le modèle analytique pourra être utilisé dans l'étude paramétrique.

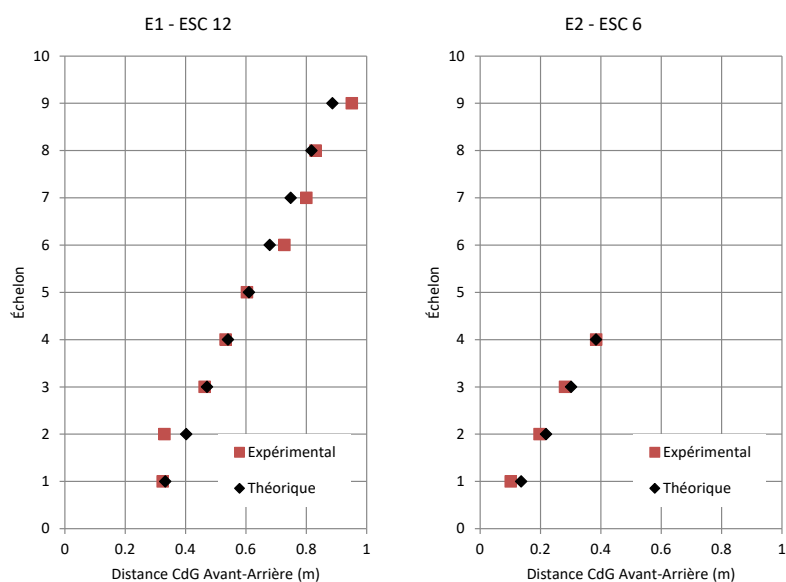


Figure 72. Comparaison des valeurs expérimentales et théoriques, pour un expérimentateur au repos.

6.2.3 Expérimentateur dans la position P1

La Figure 73 présente une comparaison de la position du CDG_{av-arr} dans le cas d'un expérimentateur en position P1 sur les escabeaux de 12 pieds et de 6 pieds. Des angles β de 17° et 14° ont été utilisés respectivement pour les escabeaux de 12 pieds et 6 pieds dans l'équation (64), ce qui donne des résultats acceptables (Figure 73).

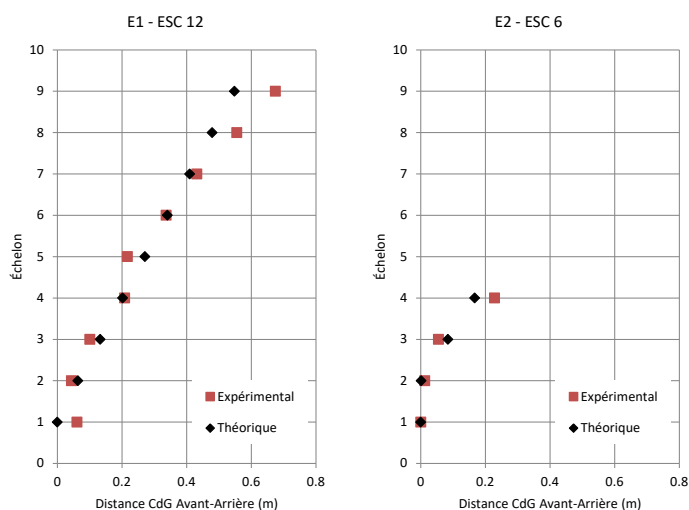


Figure 73. Comparaison des valeurs expérimentales et théoriques, pour un expérimentateur dans la position P1.

6.2.4 Expérimentateur dans la position P2

La Figure 74 présente une comparaison de la position du $CDG_{gch-dte}$ dans le cas d'un expérimentateur en position P2 sur les escabeaux de 12 pieds et de 6 pieds. La valeur de l'angle γ a été ajustée dans l'équation (69) selon l'échelon sur lequel était l'expérimentateur dans le cas de l'escabeau de 12 pieds. Les valeurs sont indiquées au Tableau 21. La valeur de l'angle γ (angle d'inclinaison de l'axe du corps de l'expérimentateur par rapport à l'axe de l'échelle ou de l'escabeau, voir Figure 102) a été ajustée dans l'équation (69) selon l'échelon sur lequel était l'expérimentateur dans le cas de l'escabeau de 12 pieds. Les valeurs sont indiquées au Tableau 21.

Tableau 21. Valeur de l'angle β en fonction de l'échelon, pour l'escabeau de 12 pieds

Échelon	Angle γ (°)
1	26
2	24
3	23
4	22
5	21
6	20
7	20
8	20
9	20

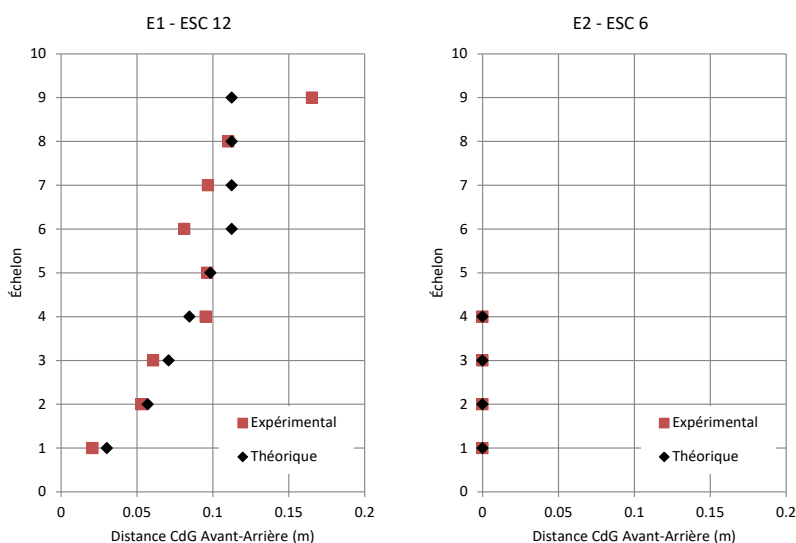


Figure 74. Comparaison des valeurs expérimentales et théoriques, pour un expérimentateur dans la position P2.

6.2.5 Expérimentateur dans la position P3

La Figure 75 présente une comparaison de la position du CDG_{av-arr} dans le cas d'un expérimentateur en position P3 sur les escabeaux de 12 pieds et de 6 pieds. Des angles β de 18° et 16° ont été utilisés respectivement pour les escabeaux de 12 pieds et 6 pieds, ce qui donne des résultats acceptables (Figure 75).

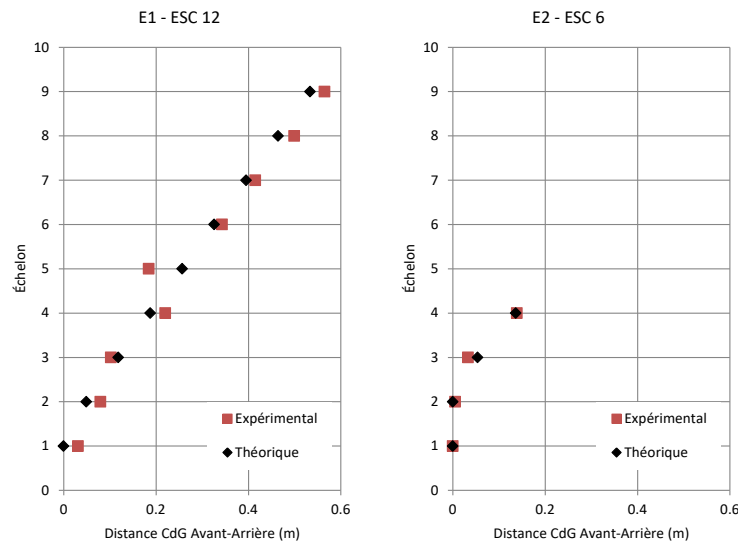


Figure 75. Comparaison des valeurs expérimentales et théoriques, pour un expérimentateur dans la position P3.

Considérant la précision acceptable avec laquelle le modèle analytique est capable de reproduire les résultats expérimentaux, celui-ci sera utilisé pour une étude paramétrique.

6.3 Étude paramétrique

Pour l'étude paramétrique, des travailleurs fictifs sont considérés et les paramètres indiqués au Tableau 22 sont utilisés dans le modèle analytique. Il y a trois travailleurs fictifs : T1, un travailleur ou une travailleuse de petit gabarit; T2, un travailleur de taille moyenne, mais plutôt lourd (légèrement au-dessus de la limite pour les échelles de la classe 1A Extra heavy-duty); et T3, un travailleur de grand gabarit et lourd. Ces travailleurs de poids et tailles peu communs devraient donner les bornes maximales et minimales de stabilité pour les échelles et escabeaux.

Tableau 22. Propriétés des travailleurs fictifs utilisés dans l'étude paramétrique

Caractéristiques	T1	T2	T3
Taille (cm)	160	170	200
Masse (kg)	50	140	140
Poids (N)	490	1373	1373

6.3.1 Échelles

Le Tableau 23 présente les propriétés des échelles utilisées pour l'étude paramétrique. L'échelle de 8 pieds en aluminium représente la borne inférieure en termes de poids pour des échelles de cette hauteur. Les poids considérés pour ces modèles d'échelles ont été tirés de la documentation d'un manufacturier.

Tableau 23. Propriétés des échelles utilisées dans l'étude paramétrique

Échelle	Classe	Poids	
		Aluminium	Fibre de verre
8 pieds – Simple	Extra heavy duty (1A)	58 N	-
16 pieds – Télescopique	Extra heavy duty (1A)	129 N	-
12 pieds – Simple	Extra heavy duty (1A)	85 N	-
24 pieds – Télescopique	Extra heavy duty (1A)	190 N	238 N

La Figure 76 présente les résultats pour l'échelle de 24 pieds de 190 N, non déployée, pour les trois travailleurs fictifs dans la position P1, suivant des angles d'installation α de 75 °, 72,5 ° et 70 °. Le travailleur le plus grand et le plus lourd (T3) présente le risque d'instabilité le plus élevé. Suivant l'angle d'installation de l'échelle, l'instabilité cesse à l'échelon 6 ou à l'échelon 4. Ainsi, pour les travailleurs grands et lourds, il sera nécessaire d'être attentif au positionnement sur l'échelle, même pour des échelons assez hauts, et tout particulièrement lorsque l'angle d'installation de l'échelle est grand.

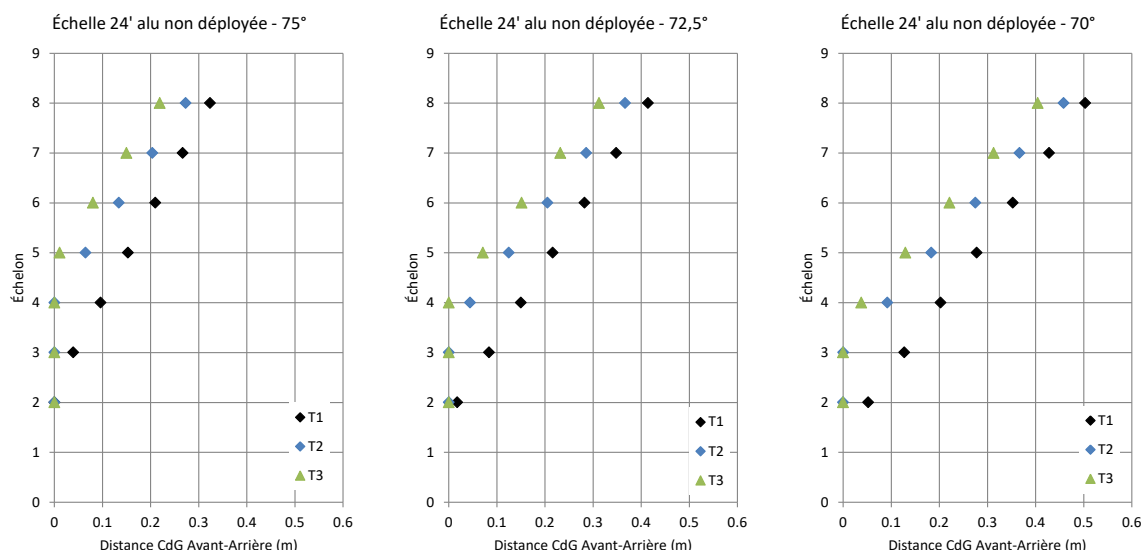


Figure 76. Influence du poids et de la taille du travailleur sur la position du CDG du système échelle-travailleur, pour l'échelle de 24'' en aluminium, non déployée, position P1.

La Figure 77 présente les résultats pour l'échelle de 24 pieds de 190 N, déployée, pour les trois travailleurs fictifs dans la position P1, suivant des angles d'installation α de 75 °, 72,5 ° et 70 °. Le travailleur le plus grand et le plus lourd (T3) présente le risque d'instabilité le plus élevé. Suivant l'angle d'installation de l'échelle, l'instabilité cesse à l'échelon 5 ou à l'échelon 3. Dans le cas d'une échelle déployée, le risque d'instabilité est plus faible.

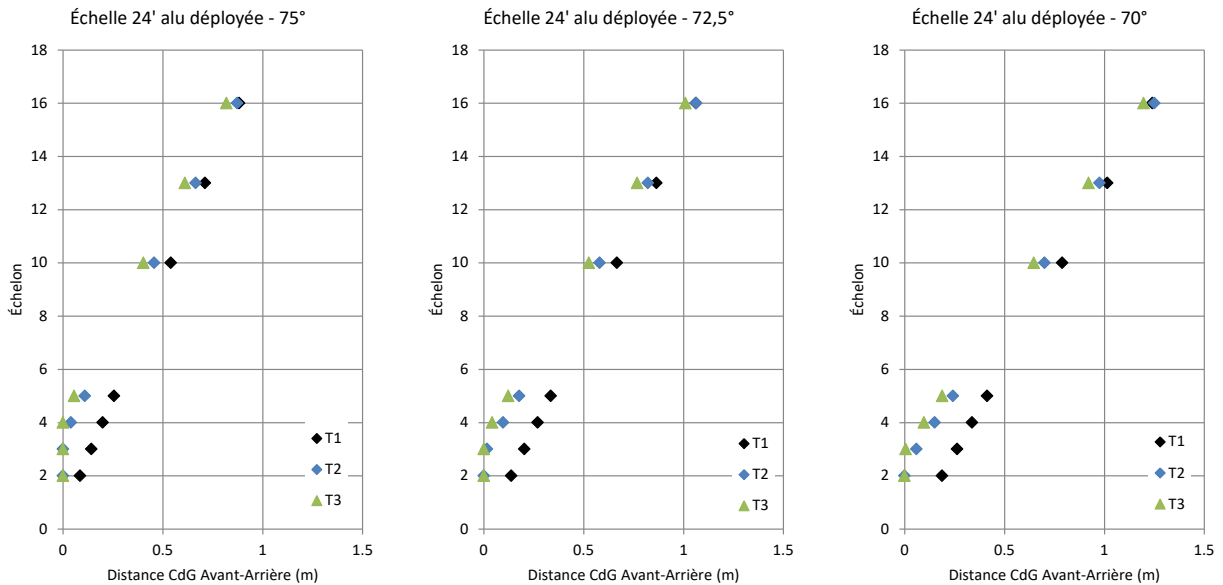


Figure 77. Influence du poids et de la taille du travailleur pour l'échelle déployée sur la position du CDG du système échelle-travailleur, position P1.

La Figure 78 présente les résultats pour l'échelle de 24 pieds de 190 N, non déployée, pour les trois travailleurs fictifs dans la position P3, suivant des angles d'installation α de 75 °, 72,5 ° et 70 °. La différence avec la position P1 n'est pas très flagrante pour un angle de 75 °, mais il y a un risque d'instabilité sur l'échelon 5 pour une échelle installée à 70 ° dans le cas du travailleur T3, qui n'était pas présente pour la position P1.

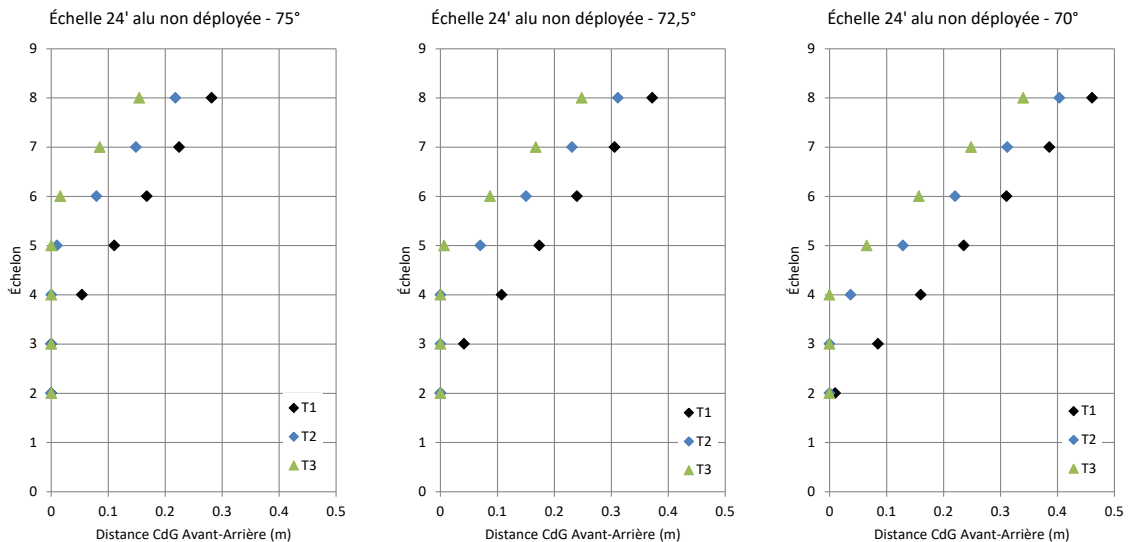


Figure 78. Influence du poids et de la taille du travailleur pour l'échelle non déployée sur la position du CDG du système échelle-travailleur, position P3.

La Figure 79 présente les résultats pour l'échelle de 24 pieds de 190 N, déployée, pour les trois travailleurs fictifs dans la position P3, suivant des angles d'installation α de 75 °, 72,5 ° et 70 °. La différence avec la position P1 n'est pas très flagrante, mais là encore, la position P3 semble légèrement plus défavorable.

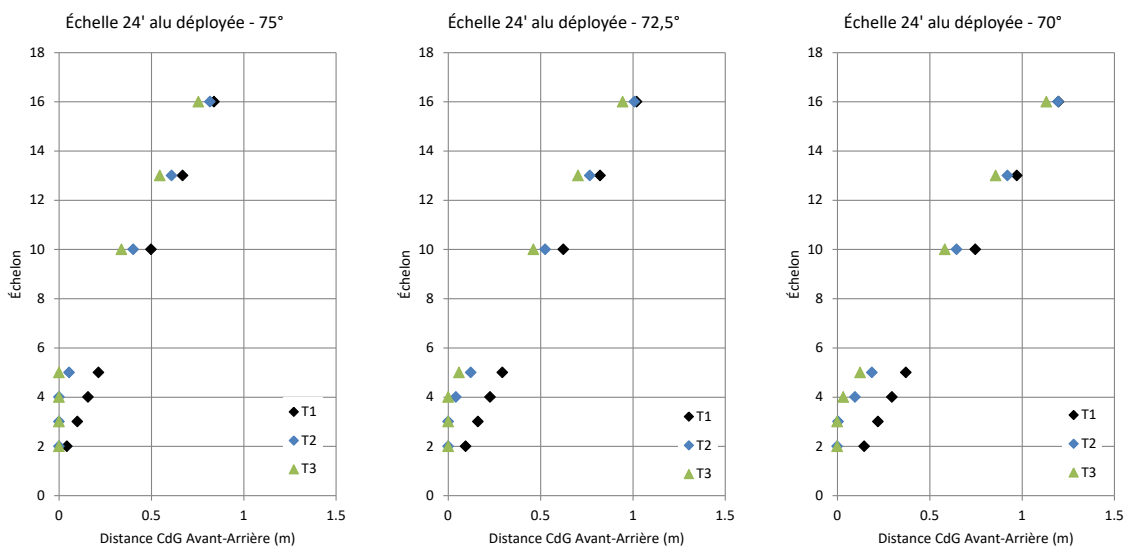


Figure 79. Influence du poids et de la taille du travailleur pour l'échelle déployée sur la position du CDG du système échelle-travailleur, position P3.

La Figure 80 présente les résultats pour le travailleur fictif T3 dans la position P3, pour différentes échelles (24 pieds télescopiques non déployés et 12 pieds), appuyées à la même hauteur (les échelles télescopiques de 24 pieds sont donc non déployées), suivant des angles d'installation α de 75 °, 72,5 ° et 70 °. L'échelle la plus légère (aluminium, 12 pieds) est celle offrant le moins de stabilité, car son poids est le plus faible. Néanmoins, la différence par rapport aux autres échelles est relativement limitée dans le cas d'un travailleur de grande taille et de poids élevé.

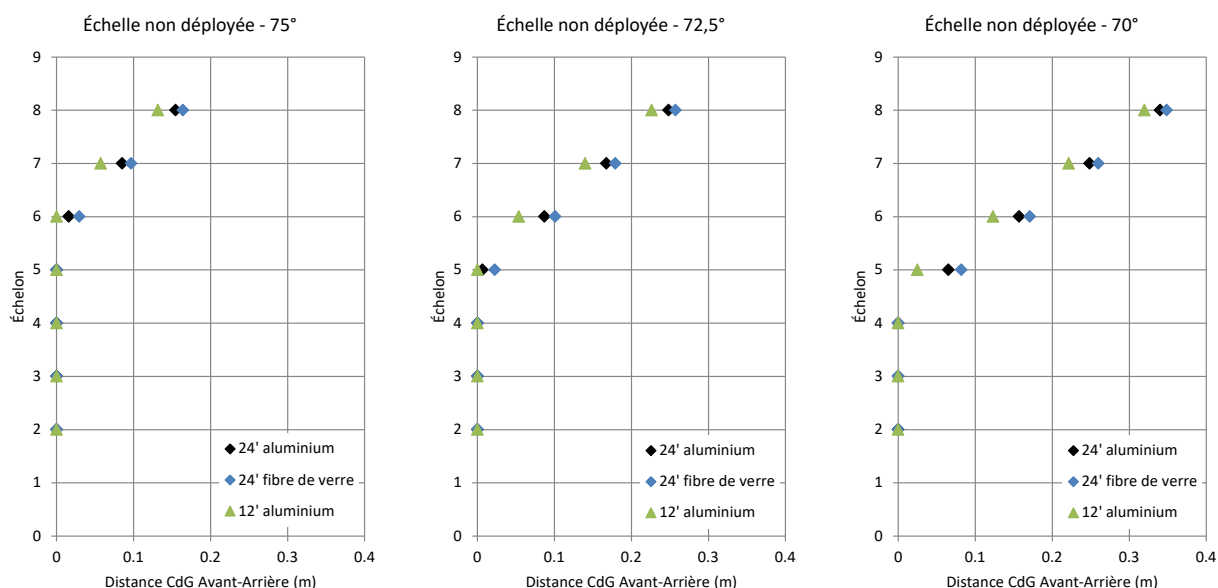


Figure 80. Influence du matériau de l'échelle non déployée sur la position du CDG du système échelle-travailleur, pour le travailleur T3 dans la position P3.

La Figure 81 présente les résultats pour le travailleur fictif T1 dans la position P3, pour différentes échelles (24 pieds télescopiques non déployés et 12 pieds), appuyées à la même hauteur (les échelles télescopiques de 24 pieds sont donc non déployées), suivant des angles d'installation α de 75 °, 72,5 ° et 70 °. L'échelle la plus légère (aluminium, 12 pieds) est celle offrant le moins de stabilité, car son poids est le plus faible. Dans le cas du travailleur le plus léger, la différence entre les échelles est nettement plus marquée que pour le travailleur T3. En effet, la stabilité n'arrive qu'un ou deux échelons plus haut dans le cas de l'échelle en aluminium single comparativement à l'échelle en fibre de verre. Pour les échelons du haut, l'impact est moins marqué. Ainsi, on pourrait suggérer d'utiliser des échelles plus lourdes afin d'éviter la perte de stabilité pour les travailleurs légers, mais ce choix pourrait conduire à des difficultés de manutentions accrues.

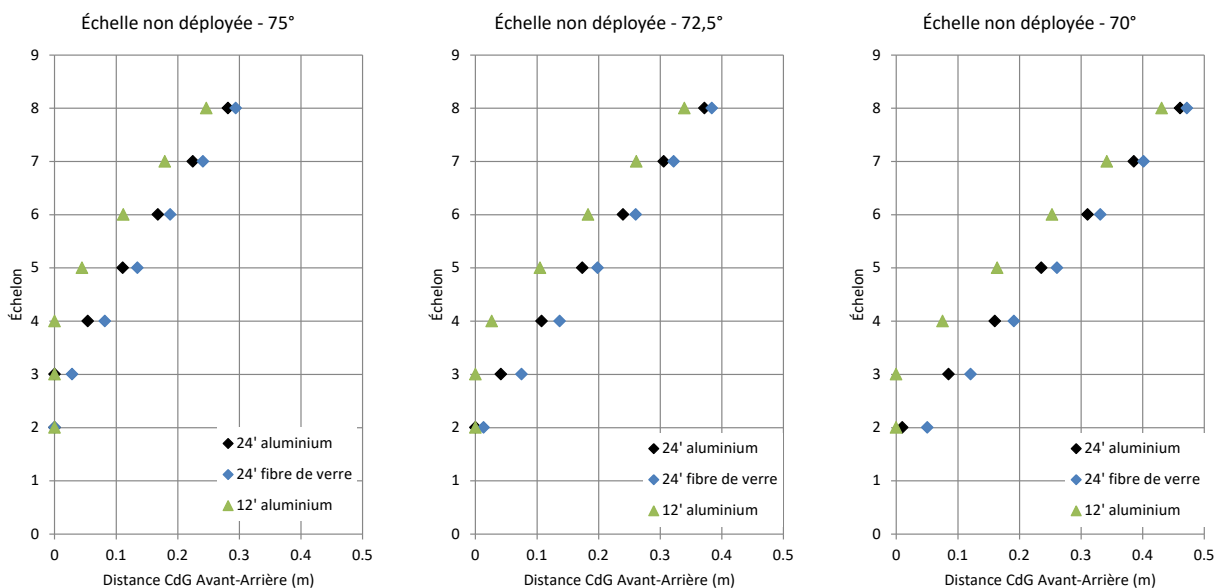


Figure 81. Influence du matériau de l'échelle non déployée sur la position du CDG du système échelle-travailleur pour le travailleur T1 dans la position P3.

La Figure 82 présente les résultats pour les travailleurs fictifs T1, T2 et T3 dans la position P1, pour différentes échelles (8 pieds et 16 pieds télescopiques non déployés), suivant des angles d'installation α de 75°, 72,5° et 70°. Les résultats indiquent que pour ces échelles de hauteur limitée, un angle d'installation de 75° présente un risque de basculement arrière très élevé, y compris pour un travailleur léger (T1), dans une position P1. Le risque diminue quand l'angle d'inclinaison diminue, mais reste malgré tout important pour l'angle de 72,5°.

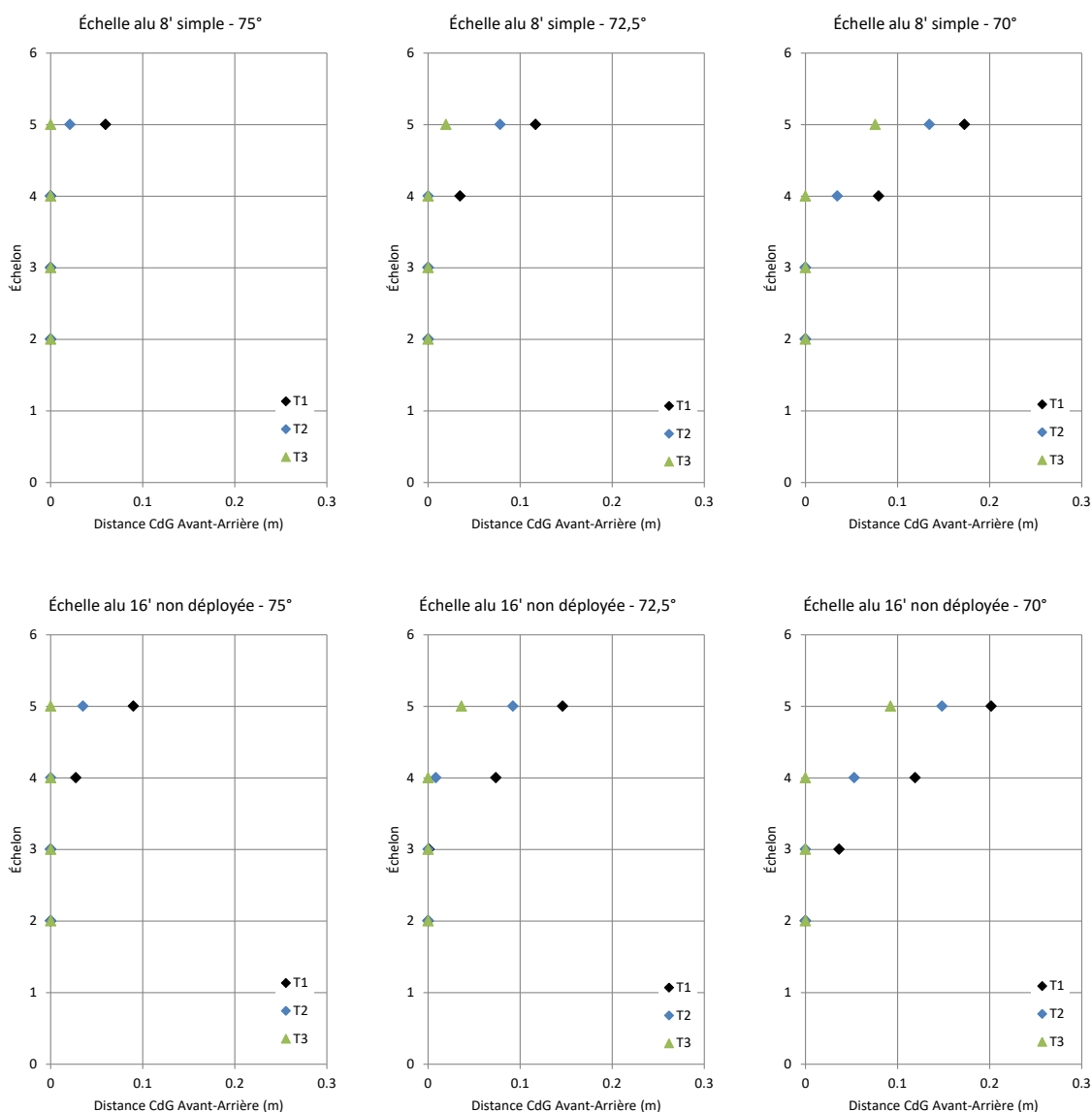


Figure 82. Influence du poids du travailleur pour une échelle de 8 pieds, position P1 pour une échelle de 8 pieds (3 graphes supérieurs) et pour une échelle de 16 pieds (3 graphes inférieurs).

6.3.2 Escabeaux

Le Tableau 24 présente les propriétés des escabeaux utilisés dans l'étude paramétrique : la taille et le matériau (poids) de ces escabeaux ont été considérés comme variables.

Tableau 24. Propriétés des escabeaux utilisés dans l'étude paramétrique

Taille escabeau	Aluminium	Fibre de verre
12 pieds	198 N	222 N
6 pieds	80 N	94 N

La Figure 83 présente les résultats pour les positions P1 à P3, pour les travailleurs T1 à T3, dans le cas de l'escabeau de 12 pieds. Pour les positions P1 et P3, le poids du travailleur semble avoir une plus grande importance que sa taille, alors que dans le cas de la position P2, les deux facteurs sont importants. Comme d'habitude, c'est le travailleur T3 (le plus grand et le plus lourd) qui a un plus grand risque d'instabilité.

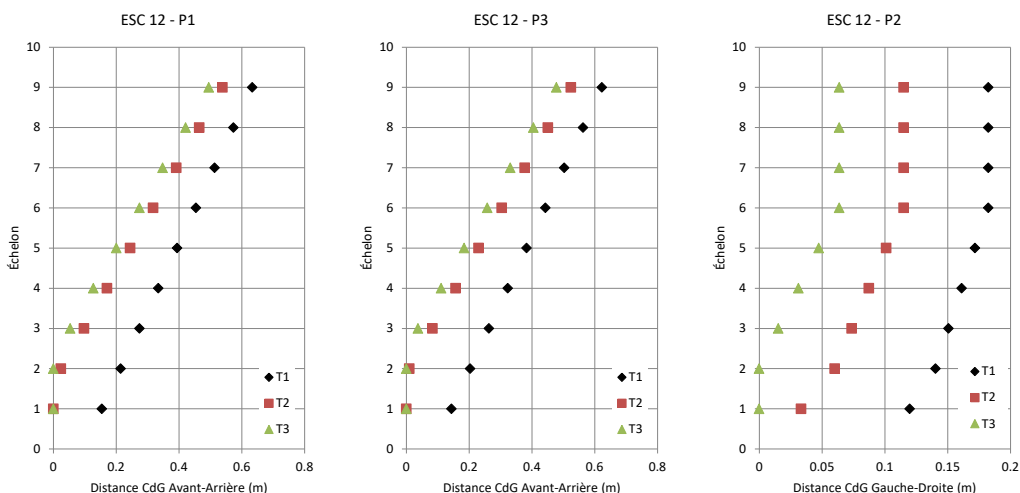


Figure 83. Influence du poids et de la taille du travailleur sur la position du CDG du système escabeau-travailleur pour l'escabeau de 12 pieds.

La Figure 84 présente les résultats pour les positions P1 à P3, pour les travailleurs T1 à T3, dans le cas de l'escabeau de 6 pieds. Pour toutes les positions, le poids et la taille du travailleur sont des facteurs importants. Comme d'habitude, c'est le travailleur T3 (le plus grand et le plus lourd) qui a un plus grand risque d'instabilité. Dans le cas de la position P2, seul le travailleur T1 reste dans la zone de stabilité, mais avec une distance de moins de 5 cm entre son CDG et le côté de l'escabeau, cette stabilité est toute relative.

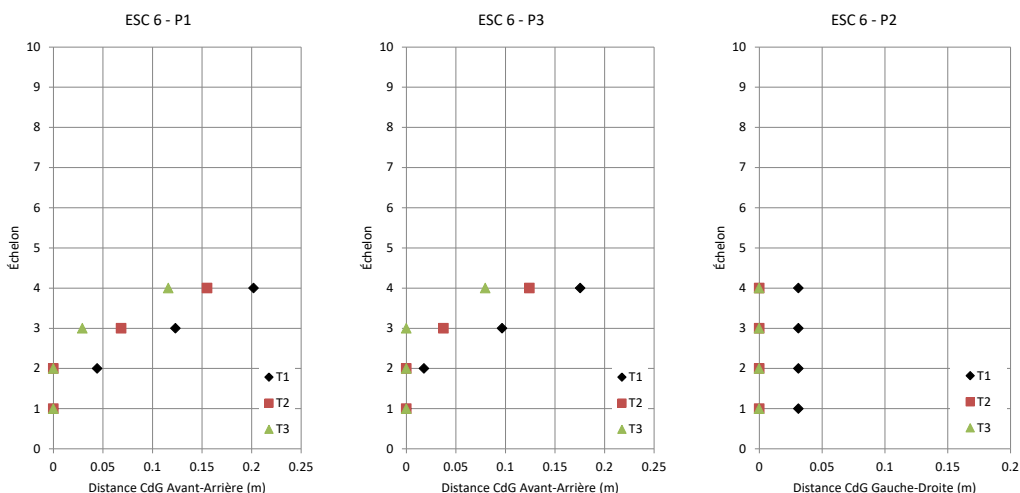


Figure 84. Influence du poids et de la taille du travailleur sur la position du CDG du système escabeau-travailleur pour l'escabeau de 6 pieds.

La Figure 85 présente les résultats pour le travailleur T3, dans les positions P1 à P3, pour les escabeaux de 12 pieds et de 6 pieds, suivant que ceux-ci soient en aluminium ou en fibre de verre. La différence de matériau ne semble pas avoir d'influence significative sur la stabilité de l'escabeau de 12 pieds ou de celui de 6 pieds.

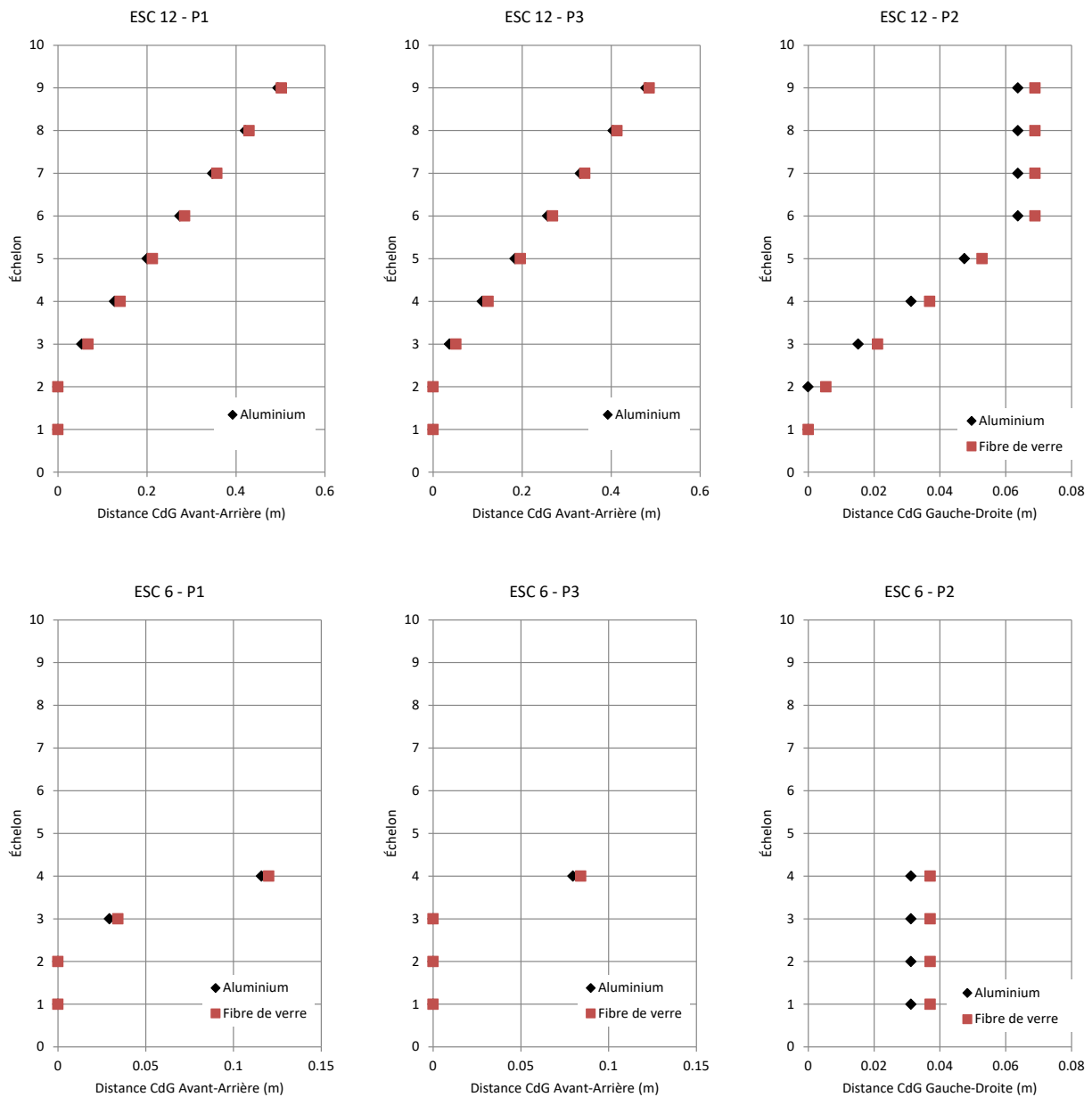


Figure 85. Influence du matériau de l'escabeau (aluminium ou fibre de verre) sur la position du CDG du système escabeau-travailleur, pour le travailleur T3.

6.4 Limite de force latérale pour les échelles

Certaines activités de travail induisent des charges latérales, par exemple : tirer une charge vers soi, nettoyer une gouttière, nécessité de racler quelque chose sur un mur, etc. Dans ces cas de figures, il est important d'estimer la force latérale maximale afin d'éviter le glissement des points d'appui au sommet de l'échelle. L'équation (3) permet d'estimer la force horizontale en pied et au sommet de l'échelle. La limite de force latérale est donc obtenue à l'aide de l'équation (4).

$$B_x = \frac{F_E \times \frac{L_E}{2} \times \cos(\alpha) + F_T \times (N_E \times 0,305 - 0,152) \times \cos(\alpha)}{z_B} \quad (3)$$

et
$$F_{lat} = B_x \times COF \quad (4)$$

Cette force latérale limite correspond à un début de glissement des points d'appui au sommet de l'échelle, ce qui ne signifie pas que l'échelle perdra l'équilibre et que le travailleur chutera au sol. En effet, le poids du travailleur permettra de garder l'équilibre du système échelle-travailleur pour une force latérale plus importante que la force latérale limite présentée dans l'équation (4). La limite de basculement latéral de l'échelle dépendra de la force latérale appliquée par le travailleur, mais également de la position latérale de son centre de gravité par rapport à l'axe de symétrie de l'échelle. Considérant le nombre élevé de paramètres à prendre en compte pour développer un modèle analytique représentatif du basculement de l'échelle sur le côté lors de l'application d'une force latérale, et l'absence de données expérimentales permettant de valider ces résultats, le choix a été fait de se limiter à l'étude de la force latérale déclenchant de glissement des points d'appui au sommet de l'échelle. Ce choix permet d'estimer des forces latérales conservatrices, et l'absence de glissement des points d'appui au sommet de l'échelle devrait permettre de conserver une sécurité maximale.

La Figure 86 présente la force latérale maximale pour une surface en acier, en fonction du travailleur, de sa hauteur sur l'échelle de 12 pieds, de l'angle d'installation de l'échelle et de son poids (échelle simple ou télescopique). Les résultats indiquent que le poids de l'échelle a un impact minime sur la force latérale maximale. Les critères ayant le plus d'importance sont le poids du travailleur et sa hauteur sur l'échelle : plus le travailleur est lourd et haut, plus la force latérale avant que le glissement des points d'appui au sommet ne survienne est importante. Néanmoins, on peut retenir que cette force latérale maximale va de 50 à 70 N au sommet de l'échelle pour le travailleur T1 (soit 11 à 16 lbf) et de 110 à 150 N au sommet de l'échelle pour le travailleur T2 (soit 25 à 34 lbf). Il est aussi possible d'observer qu'une échelle installée à un angle plus faible permettra d'appliquer des forces latérales légèrement plus importantes. Il faut noter que la force latérale déclenchant le basculement de l'échelle sur le côté suivra une évolution inverse du fait de l'augmentation du bras de levier : plus le travailleur sera haut sur l'échelle plus cette force diminuera (voir le cas de l'escabeau, où aucune force de frottement n'est présente au sommet).

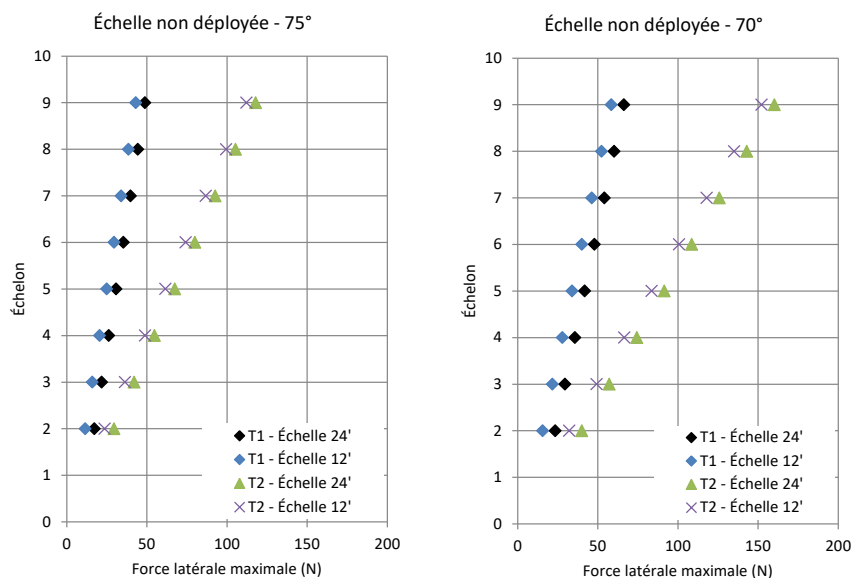


Figure 86. Force latérale maximale pour une surface en acier, en fonction de l'angle d'installation de l'échelle et du poids du travailleur, pour une échelle de 12 pieds de haut.

La Figure 87 présente la force latérale maximale pour une surface en acier, en fonction du travailleur, de sa hauteur sur l'échelle de 21 pieds et de l'angle d'installation de l'échelle. Les ordres de grandeur sont environ les mêmes que pour l'échelle non déployée, soit de 50 à 70 N pour le travailleur T1 et de 120 à 160 N pour le travailleur T2. Les résultats d'essais de coefficient de friction réalisés avec E1 installé sur l'échelon 16 sont compatibles avec le modèle théorique : le glissement est survenu autour de 100 N, et E1 est plus léger que T2.

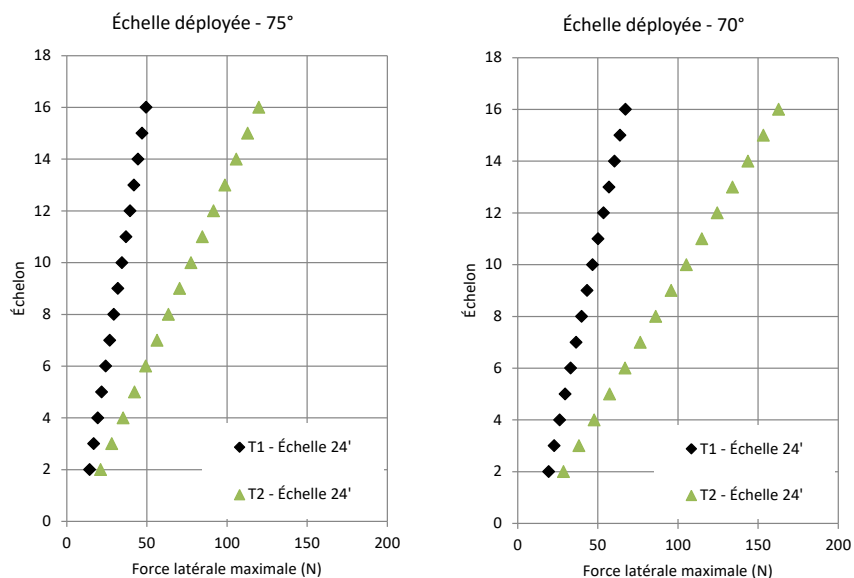


Figure 87. Force latérale maximale pour une surface en acier, en fonction de l'angle d'installation de l'échelle et du poids du travailleur, pour une échelle de 21 pieds de haut.

Lors des essais expérimentaux pour évaluer le coefficient de friction au sommet, le glissement a été observé sans que la stabilité globale du système échelle-expérimentateur ne semble compromise. La force latérale conduisant au basculement de l'échelle sur le côté est donc supérieure à la valeur de glissement présentée dans les Figures 86 et 87. Cependant, afin de maximiser la sécurité des travailleurs, le glissement des points d'appui de l'échelle en son sommet ne devrait pas survenir. Comme règle du pouce, on pourra retenir que la force latérale maximale admissible au sommet de l'échelle est d'environ le poids du travailleur divisé par 10.

6.5 Limite de force latérale pour les escabeaux

Certaines activités de travail induisent des charges latérales, par exemple : tirer une charge vers soi, nettoyer une gouttière, nécessité de racler quelque chose sur un mur, etc. Dans ces cas de figures, il est important d'estimer la force latérale maximale afin d'éviter le basculement de l'escabeau sur le côté. La dérivation d'équation est présentée en Annexe B.III.V.

Les résultats sont présentés à la Figure 88 pour les travailleurs T1 et T2, et les escabeaux de 6 et 12 pieds en aluminium. La différence calculée entre un escabeau en aluminium et en fibre de verre étant inférieure à 5 N, et compte tenu des forces latérales maximales, seuls les résultats pour les escabeaux en aluminium sont présentés. Ces derniers démontrent que plus le travailleur sera installé haut sur l'escabeau, plus la force latérale maximale sera faible.

Comme règle du pouce, on pourra retenir que la force latérale maximale admissible au sommet de l'escabeau est d'environ le poids du travailleur divisé par 7.

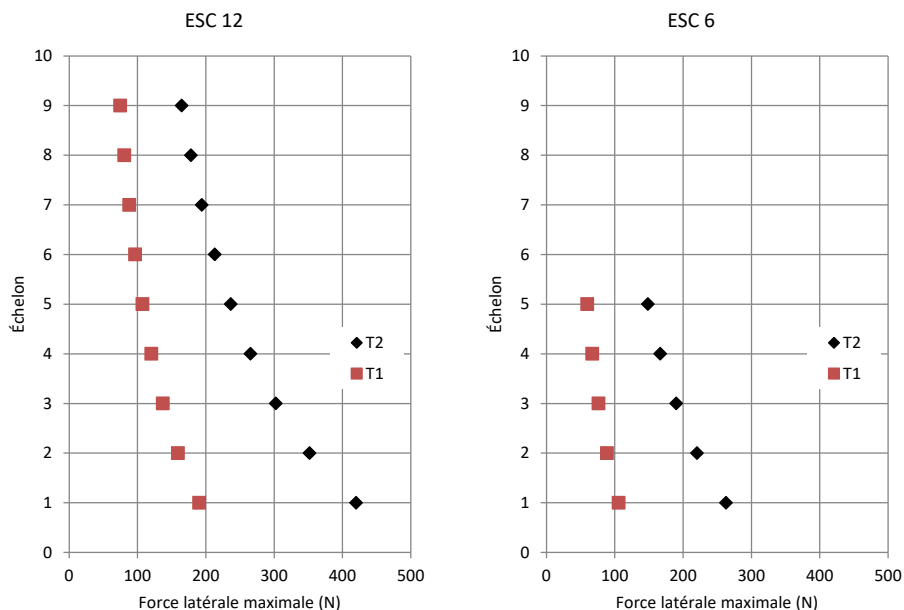


Figure 88. Force latérale maximale en fonction du poids du travailleur, pour des escabeaux de 6 et 12 pieds de haut.

7. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

7.1 Surfaces d'appui critiques pour les échelles

Une série d'essais afin d'évaluer les coefficients de friction en pied et en tête d'échelle a été effectuée.

Au sommet de l'échelle, la surface donnant le coefficient de friction le plus faible est l'acier (0,412), puis le gypse, la brique et finalement le bois (0,565). Lorsque l'échelle est appuyée sur ses montants, c'est aussi l'acier qui offre le coefficient de friction le plus faible (0,393), alors que le bois et l'aluminium ont des coefficients de friction bien plus élevés (de l'ordre de 0,9). Ceci est notamment dû à la souplesse de l'aluminium et au fait que des stries perpendiculaires au déplacement sont présentes sur les montants de l'échelle. Les essais de stabilité en glissement au sommet de l'échelle ont donné des demandes en friction latérale maximale de l'ordre de 80 %.

Au pied de l'échelle, la surface donnant le coefficient de friction le plus faible est le carrelage (0,53), cependant l'ordre de grandeur est le même pour le béton lisse. Le coefficient de friction du carrelage est cependant nettement plus faible lorsqu'il y a une présence d'eau (0,39) alors que, du fait de sa porosité, le coefficient de friction du béton lisse mouillé ne varie presque pas. Lors des essais de stabilité, la demande en friction horizontale maximale a ponctuellement dépassé les 100 %, lorsque l'expérimentateur donnait des mouvements d'impulsion sur ses jambes, engendrant ainsi un bref déplacement du pied de l'échelle. Néanmoins, le dépassement était suffisamment bref pour retrouver de la friction et stabiliser l'échelle ensuite. Dans le cas du carrelage mouillé par contre, lors des impulsions, la demande en friction a dépassé 100 % et un glissement important a été observé au pied de l'échelle : celui-ci est venu en butée contre la plaque d'acier limitant son déplacement en dehors de la plateforme de force. Il est important de rappeler que l'installation d'une échelle sur une surface souillée, que ce soit par de l'eau, un lubrifiant ou un matériau granulaire comme du sable est à proscrire. Une échelle devrait toujours être installée sur une surface propre et sèche.

7.2 Limites de stabilité pour les échelles

Un total de 232 essais de stabilité a été effectué sur des échelles de 24' télescopiques en aluminium ou fibre de verre, en conservant trois points d'appui : 138 essais pour les échelles non déployées et 94 essais pour les échelles déployées. Ces essais ont été réalisés par deux expérimentateurs de taille et poids différents. Dans le cas de l'expérimentateur le plus léger, quelques essais ont été réalisés en l'équipant d'une veste et d'une ceinture lestées afin de représenter un travailleur de même taille, mais de poids supérieur.

Dans le cas d'une échelle non déployée, pour l'expérimentateur E1 (le plus grand et lourd), le risque d'instabilité est présent aux échelons 2 et 3 pour tous les angles d'installation et positions; à l'échelon 4 pour tous les angles d'installation dans le cas des positions P1 (reculé, bras tendus) et P3 (retourné); et aux échelons 5 et 6 dans le cas de la position P3 pour des angles d'installation de 72,5 ° et 75 ° respectivement. En d'autres termes, plus l'angle d'installation est important, plus le risque de basculement arrière est grand, et présent jusqu'à une hauteur importante sur l'échelle.

Dans le cas d'une échelle non déployée, pour l'expérimentateur E2, le risque d'instabilité pour la position P2 (penché sur le côté) n'existe que pour l'échelon 2. Le risque d'instabilité pour les positions P1 et P3 est présent aux échelons 3 et 4, et à l'échelon 5 pour la position P3, dans le cas d'un angle d'installation de 75 °.

Le matériau de l'échelle influe également sur le risque d'instabilité : plus l'échelle est lourde, moins le risque d'instabilité est grand. Choisir une échelle en fibre de verre permet d'abaisser l'échelon pour lequel le risque d'instabilité existe d'un échelon pour la position P1 et de deux échelons pour la position P2 comparativement à une échelle de mêmes dimensions en aluminium. Cependant, une échelle plus lourde entraîne des contraintes supplémentaires pour sa mise en place et sa manutention, qui doivent également être considérées.

Les essais réalisés pour une transmission de poids ou une tâche de vissage sur le côté de l'échelle n'ont pas mené à des instabilités. Dans le cas du vissage, l'instabilité était loin d'être atteinte pour le cas du vissage sur le côté de l'échelle, mais le risque de basculement arrière était faible dans le cas d'un vissage entre les montants de l'échelle, pour un angle d'installation de l'échelle de 75 °, pour l'expérimentateur E1. Le risque d'instabilité aurait été plus élevé pour l'expérimentateur E2. Dans le cas de la transmission de poids sur le côté, le risque d'instabilité était très faible également, mais il est à noter que l'expérimentateur a tout le temps gardé ses trois points d'appui, et que le poids était équipé d'une poignée.

Pour les essais de montée d'échelle, à des angles de 72,5 ° et 75 °, un risque de basculement arrière existe si le travailleur monte face à l'échelle. L'utilisation d'une technique adaptée, en montant les premiers échelons de l'échelle de côté, permet de limiter, voire d'éliminer le risque de basculement arrière. Une bonne formation est donc nécessaire pour utiliser adéquatement une échelle et savoir comment monter de manière sécuritaire. Enfin, l'utilisation d'une échelle en fibre de verre, plus lourde, permet de limiter le risque de basculement arrière.

Les essais réalisés pour une échelle déployée ont essentiellement confirmé les tendances générales observées pour une échelle non déployée. Le risque d'instabilité pour une échelle déployée s'avère limité aux échelons 2 et 3 pour les positions P1 et P3 et à l'échelon 2 pour la position P2, dans le cas d'une échelle en aluminium installée à un angle de 75 °.

L'étude paramétrique menée à l'aide de modèles analytiques a permis de valider les observations faites lors des essais et de généraliser les conclusions pour les échelles déployées et non déployées. Plus le travailleur sera lourd, plus le risque d'instabilité sera présent sur des échelons assez hauts par rapport au sol (5^e ou 6^e échelon suivant les positions). La taille du travailleur est également un facteur influençant le risque de perte de stabilité : un travailleur plus grand présente un risque d'instabilité plus important, mais ce paramètre est moins déterminant que le poids du travailleur. Finalement, une échelle plus légère, notamment une échelle simple de 8 pieds, présente un risque accru de perte de stabilité, jusqu'au 4^e ou 5^e échelon suivant l'angle d'installation, et ce, même pour un travailleur très léger (50 kg).

Certaines activités de travail induisent des charges latérales, par exemple : tirer une charge vers soi, nettoyer une gouttière, nécessité de racler quelque chose sur un mur, etc. Dans ces cas de figures, il est important d'estimer la force latérale maximale afin d'éviter le glissement des points d'appui de l'échelle en son sommet. L'estimation de la force latérale maximale a été faite en utilisant le modèle analytique. Bien entendu, cette force latérale limite est une fonction du poids du travailleur et de l'échelle. Néanmoins, en première approximation, on pourra retenir que la

force latérale maximale au sommet de l'échelle est de l'ordre du poids du travailleur divisé par 10. Cette force latérale limite est conservatrice et vise à éviter le glissement des points d'appui au sommet de l'échelle. La force latérale conduisant au basculement de l'échelle sur le côté sera plus importante.

7.3 Limites de stabilité pour les escabeaux

Un total de 39 essais de stabilité a été effectué sur des escabeaux en aluminium en conservant trois points d'appui : 27 essais pour un escabeau de 12 pieds de haut et 12 essais pour un escabeau de 6 pieds de haut. Ces essais ont été réalisés par deux expérimentateurs de tailles et poids différents : l'expérimentateur le plus grand et lourd a été sollicité pour les essais de stabilité sur l'escabeau de 12 pieds, car toutes les positions stables avec lui le seront aussi pour les travailleurs plus légers; l'expérimentateur le plus léger a été sollicité pour les essais de stabilité sur l'escabeau de 6 pieds, car une instabilité observée avec le plus léger des deux expérimentateurs entraînera nécessairement une instabilité avec un travailleur de poids égal ou supérieur.

Dans le cas de l'escabeau de 6 pieds, seules les positions P1 et P3 (reculé et retourné), lorsque l'expérimentateur était sur l'échelon 4 ont permis d'atteindre un équilibre statique. Tous les autres essais ont mené à une perte de stabilité. En d'autres termes, les escabeaux de 6 pieds, en aluminium, sont très instables dès lors que le travailleur les utilisant se penche un peu sur le côté ou vers l'arrière. Bien que la hauteur de chute d'un escabeau de ce type soit relativement faible, il est néanmoins probable que le travailleur se blesse lors de la chute. D'autre part, étant donné la faible hauteur de ce type d'escabeau, il est probable que des travailleurs peu formés ou habitués à utiliser ce type d'équipement y recourent, sans nécessairement avoir conscience des risques encourus lorsqu'ils déportent leur CDG du centre de l'escabeau.

Dans le cas de l'escabeau de 12 pieds, les essais réalisés avec le plus grand et lourd des deux expérimentateurs n'ont jamais mené à des instabilités. Seuls les essais réalisés avec le travailleur installé sur le premier échelon présentaient un risque faible d'instabilité.

L'étude paramétrique menée avec le modèle analytique a permis de généraliser un peu les observations faites lors des essais : dans le cas d'un travailleur très lourd et/ou très grand, il y a un risque d'instabilité important pour les deux premiers échelons (P1, P2 et P3), et modéré à grand pour le troisième échelon (positions P1 et P3).

Comme pour les échelles, l'estimation de la force latérale maximale a été faite en utilisant le modèle analytique. Là encore, cette force latérale limite est une fonction du poids du travailleur et de l'escabeau. En première approximation, on pourra retenir que la force latérale maximale au sommet de l'escabeau est de l'ordre du poids du travailleur divisé par 7.

7.4 Recommandations générales sur l'utilisation d'échelles et escabeaux

En se basant sur la littérature scientifique disponible et sur les résultats d'essais présentés dans ce rapport de recherche, les recommandations suivantes devraient être mises en œuvre lors de l'utilisation des échelles :

- Dans la mesure du possible, il serait souhaitable d'éviter le travail à l'échelle et de remplacer par des plates-formes élévatrices mobiles, qui sont beaucoup plus sécuritaires;

- Lors de la montée et de la présence sur l'échelle, le travailleur devrait toujours maintenir un minimum de trois points d'appui. Ceci implique notamment que certaines tâches de travail ne peuvent pas être réalisées en utilisant une échelle;
- L'angle d'installation de l'échelle doit avoir une valeur comprise en 70 ° et 75 ° pour être conforme à la réglementation en vigueur au Québec. Les résultats d'essais ont cependant montré qu'un angle d'installation de 75 ° présente un risque accru de basculement arrière ou de glissement du sommet de l'échelle pour des échelles légères et de petites dimensions. Ainsi, lorsque les conditions d'appui au sol le permettent (friction élevée), il serait souhaitable de choisir un angle d'installation légèrement plus faible, de l'ordre de 70 ° à 72 °, en particulier pour les échelles de faible hauteur, où le travailleur sera positionné sur les échelons du bas. Pour les échelles de grande hauteur (12 pieds et plus), l'angle de 75 ° reste la référence à utiliser. L'App du NIOSH permet notamment de mesurer l'angle d'installation de l'échelle;
- Afin de limiter le risque de perte de stabilité, le travailleur devrait éviter de trop déporter son CDG sur le côté de l'échelle (garder le sternum entre les montants de l'échelle) ou en arrière de ses pieds, en particulier sur les échelons les plus bas de l'échelle (jusqu'au 5^e ou 6^e échelon dans le cas d'un travailleur grand et lourd);
- Le matériau de l'échelle influence la stabilité du système échelle-travailleur : une échelle plus légère sera moins stable, mais plus facile à manutentionner. Il y a donc un équilibre à trouver entre la facilité de manutention et le risque de perte de stabilité pour les différents somatotypes de travailleurs;
- Les escabeaux de faible hauteur, très légers et d'empannement réduit, présentent des risques d'instabilité majeurs, même pour les travailleurs légers et de petite taille. Leur utilisation devrait être faite en connaissance de cause, et il serait souhaitable de rappeler aux travailleurs qu'une chute, même de hauteur limitée, peut générer des blessures graves et un arrêt de travail;
- Finalement, les essais de montée et descente d'une échelle ont mis en évidence qu'une formation adéquate sur les techniques à adopter permet de limiter les pertes de stabilité.

7.5 Limites de l'étude et recommandations pour de futures études

Les résultats de l'étude présentée dans ce rapport se basent exclusivement sur des essais de laboratoire, réalisés dans des conditions sécuritaires et quasi idéales en termes d'installation des échelles et escabeaux : surfaces planes, propres et sèches, angles d'inclinaison des échelles respectant les critères prescrits par les réglementations provinciales. Les deux expérimentateurs sont des formateurs en protection contre les chutes de hauteur, ils ont donc une habitude certaine du travail en hauteur d'une part, et des techniques éprouvées pour monter sur une échelle d'autre part. Finalement, les expérimentateurs ont en tout temps maintenu trois points d'appui sur l'échelle, ce qui constitue la façon sécuritaire de se déplacer sur une échelle ou un escabeau.

Ainsi, afin de consolider les recommandations et observations obtenues dans cette étude, de futurs travaux de recherche pourraient se pencher sur les points suivants :

-
- Observations dans des milieux de travail, en établissement ou sur des chantiers de construction, afin d'identifier les critères de choix ou les stratégies de mise en place d'échelle par des travailleurs, ainsi que les contraintes auxquelles ils sont confrontés;
 - Réalisation d'essais avec un panel plus large de sujets humains : plus grande diversité dans les poids et tailles, mais également analyse de l'influence de la formation et de l'habitude d'utilisation des échelles;
 - Réalisation d'essais avec des contraintes de mise en place d'échelle représentant des cas observés en situation réelle : surface inclinée, surface souillée, angle d'inclinaison trop faible;
 - Réalisation d'essais avec une plus grande variété de tâches de travail simulées;
 - Réalisation d'essais de stabilité avec application d'une force latérale à différentes hauteurs sur l'échelle pour estimer la force latérale conduisant au basculement sur le côté, pour des travailleurs de poids et tailles différents;
 - Utilisation d'échelles ou escabeaux faisant appel à des dispositifs de retenue ou de stabilisation et évaluation de l'efficacité de tels dispositifs.

BIBLIOGRAPHIE

- American Ladder Institute. (2017). *Ladders: Portable metal: Safety requirements*. Norme ANSI ASC A14.2-2017. Chicago, IL: ANSI.
- Article R4323-63 (Décret n°2008-244 du 7 mars 2008 - art. (V)).
- Association canadienne de normalisation. (2012). *Échelles portatives*. Norme CSA Z11. Toronto, ON: CSA.
- Bureau of Labor Statistics. (2012). *Work-related fatal falls, by type of fall, 2010*. Tiré de <https://www.bls.gov/iif/oshwc/cfoi/cfch0009.pdf>
- Chang, W.-R., Chang, C.-C., Matz, S. et Son, D. H. (2004). Friction requirements for different climbing conditions in straight ladder ascending. *Safety Science*, 42(9), 791-805. doi: 10.1016/j.ssci.2004.02.002
- Chang, W.-R., Huang, Y.-H., Chang, C.-C., Brunette, C. et Fallentin, N. (2016). Straight ladder inclined angle in a field environment: the relationship among actual angle, method of set-up and knowledge. *Ergonomics*, 59(8), 1100-1108. doi: 10.1080/00140139.2015.1115897
- Chang, W. R., Chang, C.-C. et Matz, S. (2005). Available friction of ladder shoes and slip potential for climbing on a straight ladder. *Ergonomics*, 48(9), 1169-1182. doi: doi:10.1080/00140130500197229
- Clift, L. (2004). *Evaluating the performance and effectiveness of ladder stability devices* (Rapport n° 205). Londres, Angleterre: HSE. Tiré de <https://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr205.pdf>
- Clift, L., Harris, D. et Beasty, W. (2006). *Evaluating the stability requirements for mounting and dismounting from the top of leaning ladders* (Rapport n° 478). Londres, Angleterre: HSE. Tiré de <https://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr478.pdf>
- Code de sécurité pour les travaux de construction*, RLRQ, c. S-2.1, r. 4
- Commission de la construction du Québec. (2019). *Statistiques annuelles de l'industrie de la construction 2018*. Montréal, QC: CCQ
- Construction projects*, O Reg 213/91
- Duguay, P., Boucher, A., Busque, M.-A., Prud'homme, P. et Vergara, D. (2012). *Lésions professionnelles indemnisées au Québec en 2005-2007 : profil statistique par industrie : catégorie professionnelle* (Rapport n° R-749). Montréal, QC: IRSST.
- 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: IRSST.
- Hammer, W. et Schmalz, U. (1992). Human behaviour when climbing ladders with varying inclinations. *Safety Science*, 15(1), 21-38. doi: 10.1016/0925-7535(92)90037-Z
- Hsiao, H., Simeonov, P., Pizatella, T., Stout, N., McDougall, V. et Weeks, J. (2008). Extension-ladder safety: Solutions and knowledge gaps. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 38(11), 959-965. doi: 10.1016/j.ergon.2008.01.011
- Lipscomb, H. J., Schoenfisch, A., Shishlov, K. et Myers, D. J. (2010). Nonfatal tool- or equipment-related injuries treated in US emergency departments among workers in the construction industry, 1998-2005. *American Journal of Industrial Medicine* 53(6), 581-587. doi: 10.1002/ajim.20839.
- Lombardi, D. A., Smith, G. S., Courtney, T. K., Brennan, M. J., Kim, J. Y. et Perry, M. J. (2011). Work-related falls from ladders: A follow-back study of US emergency department cases. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 37(6), 525-532.

- Marsh, S. M. et Jackson, L. L. (2013). A comparison of fatal occupational injury event characteristics from the census of fatal occupational injuries and the vital statistics mortality system. *Journal of Safety Research*, 46, 119-125. doi: 10.1016/j.jsr.2013.05.004
- Martin, E. R., Pliner, E. M. et Beschorner, K. E. (2020). Characterizing the shoe-rung friction requirements during ladder climbing. *Journal of Biomechanics*, 99, 109507. doi: 10.1016/j.jbiomech.2019.109507
- McGinnis, P. (2013). *Biomechanics of sport and exercise* (3^e éd.). Tiré de <http://ik.fik.um.ac.id/wp-content/uploads/2018/02/1.pdf>
- McIntyre, D. R. (1983). Gait patterns during free choice ladder ascents. *Human Movement Science*, 2(3), 187-195. doi: 10.1016/0167-9457(83)90016-7
- Nadhim, E. A., Hon, C., Xia, B., Stewart, I. et Fang, D. (2016). Falls from height in the construction industry: A critical review of the scientific literature. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(7), 638. doi: 10.3390/ijerph13070638
- O'Sullivan, J., Wakai, A., O'Sullivan, R., Luke, C. et Cusack, S. (2004). Ladder fall injuries: patterns and cost of morbidity. *Injury*, 35(4), 429-431. doi: 10.1016/S0020-1383(03)00265-1
- Occupational Health and Safety Regulation*, BC Reg. 296/97
- Occupational Safety and Health Administration. (2019). *OSHA 1926: Safety and health regulations for construction: Subpart X: Stairways and ladders*. Norme OSHA 1926.1053. Washington, DC: OSHA.
- Ontario Ministry of Labour. (2011). *Ladder safety in construction*. Tiré de https://www.labour.gov.on.ca/english/hs/sawo/pubs/fs_laddersafety.php
- Partridge, R. A., Virk, A. S. et Antosia, R. E. (1998). Causes and patterns of injury from ladder falls. *Academic Emergency Medicine*, 5(1), 31-34. doi: 10.1111/j.1553-2712.1998.tb02571.x
- Pliner, E. M. et Beschorner, K. (2017). Effects of ladder climbing patterns on fall severity. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 61(1), 940-944. doi: 10.1177/1541931213601717
- Pliner, E. M., Seo, N. J. et Beschorner, K. E. (2017). Factors affecting fall severity from a ladder: Impact of climbing direction, gloves, gender and adaptation. *Applied Ergonomics*, 60, 163-170. doi: 10.1016/j.apergo.2016.11.011
- Pliner, E. M., Seo, N. J., Ramakrishnan, V. et Beschorner, K. E. (2019). Effects of upper body strength, hand placement and foot placement on ladder fall severity. *Gait & Posture*, 68, 23-29. doi: 10.1016/j.gaitpost.2018.10.035
- Règlement sur la santé et la sécurité du travail*, RLRQ, c. S-2.1, r. 13.
- Safework Australia. (2013). *Work-related injuries and fatalities involving a fall from height, Australia*. Tiré de <https://www.safeworkaustralia.gov.au/system/files/documents/1702/falls-from-height.pdf>
- Shepherd, G. W., Kahler, R. J. et Cross, J. (2006). Ergonomic design interventions: A case study involving portable ladders. *Ergonomics*, 49(3), 221-234. doi: 10.1080/00140130600576454
- Simeonov, P., Hsiao, H., Kim, I. J., Powers, J. R. et Kau, T. Y. (2012). Factors affecting extension ladder angular positioning. *Human Factors*, 54(3), 334-345. doi: 10.1177/0018720812445805
- Simeonov, P., Hsiao, H., Powers, J., Kim, I. J., Kau, T. Y. et Weaver, D. (2013). Research to improve extension ladder angular positioning. *Applied Ergonomics*, 44(3), 496-502. doi: 10.1016/j.apergo.2012.10.017

Simeonov, P., Hsiao, H. et Powers, J. R. (27 août 2013). Ladder safety: There's an app for that. [Billet de blogue]. Tiré de <https://blogs.cdc.gov/niosh-science-blog/2013/08/27/ladder-safety/>

Worksafe Victoria. (2019). *Compliance code: Prevention of falls in housing construction* (2^e éd.). Tiré de <https://content.api.worksafe.vic.gov.au/sites/default/files/2020-02/ISBN-Compliance-code-prevention-falls-housing-construction-2019-12.pdf>

ANNEXE A : ÉVALUATION DE LA POSITION DES CDG

Cette annexe présente les équations permettant d'évaluer la position des CDG avant-arrière et gauche-droite pour le système échelle-expérimentateur et escabeau-expérimentateur.

A.1 Notations

Dans cette annexe, les notations suivantes sont utilisées.

α	L'angle de l'échelle par rapport au sol
A_z	La réaction verticale à l'appui A
B_x	La réaction horizontale du mur, au sommet de l'échelle
B_z	La réaction verticale à l'appui B
CDG_{av-arr}	La distance horizontale entre le CDG du système échelle-expérimentateur et l'appui A
$CDG_{gch-dte}$	La distance horizontale entre le CDG du système échelle-expérimentateur et le montant de gauche de l'échelle ou de l'escabeau
D_z	La somme des réactions du côté droit de l'escabeau
F_E	Le poids de l'échelle (ou de l'escabeau), concentré en son CDG
F_T	Le poids du travailleur, concentré en son CDG
F_V	La force verticale totale du système travailleur escabeau, dans le sens de la gravité
G_z	La somme des réactions du côté gauche de l'escabeau
L_E	La longueur de l'échelle (ou de l'escabeau)
l_E	La largeur de l'escabeau
R_{3x}	La réaction horizontale mesurée par la plateforme de force de gauche au sommet de l'échelle, selon l'axe X
R_{4x}	La réaction horizontale mesurée par la plateforme de force de gauche au sommet de l'échelle, selon l'axe X
R_{3y}	La réaction horizontale mesurée par la plateforme de force de gauche au sommet de l'échelle, selon l'axe Y

R_{4y}	La réaction horizontale mesurée par la plateforme de force de gauche au sommet de l'échelle, selon l'axe Y
R_{1z}	La réaction verticale mesurée par la plateforme de force de gauche au pied de l'échelle ou de l'escabeau
R_{2z}	La réaction verticale mesurée par la plateforme de force de droite au pied de l'échelle ou de l'escabeau
R_{3z}	La réaction verticale mesurée par la plateforme de force arrière gauche au pied de l'escabeau
R_{4z}	La réaction verticale mesurée par la plateforme de force arrière droite au pied de l'escabeau
x_E	La distance horizontale entre l'appui A et le CDG de l'échelle, selon l'axe X
x_T	La distance horizontale entre l'appui A et le CDG du travailleur, selon l'axe X
y_E	La distance horizontale entre le montant de gauche et le CDG de l'échelle, selon l'axe Y
y_T	La distance horizontale entre le montant de gauche et le CDG du travailleur, selon l'axe Y
y_2	La distance horizontale entre les montants de l'échelle
z_B	La hauteur du point d'appui de l'échelle au mur, par rapport au pied de l'échelle

A.II Évaluation de la position des CDG pour les échelles

A.II.I CDG *av-arr*

Pour un travailleur au repos, l'équilibre statique des forces en deux dimensions donne le diagramme de corps libre (DCL) présenté à la Figure 89.

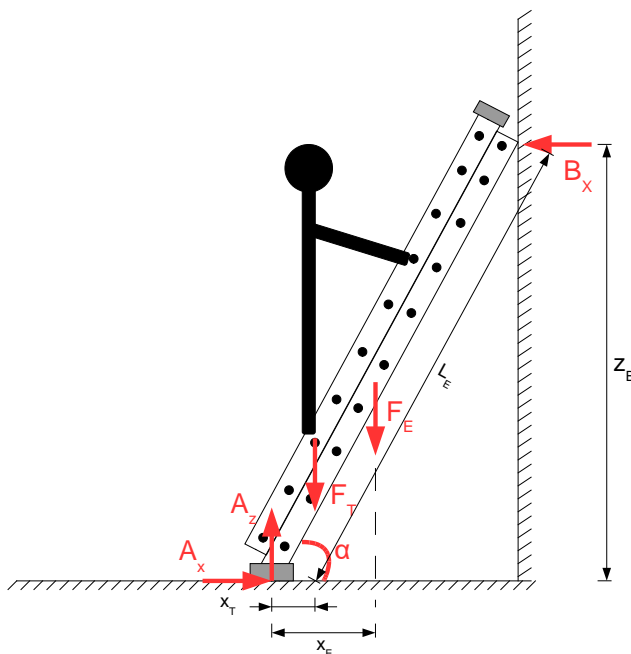


Figure 89. Diagramme de corps libre pour le système échelle-travailleur dans le sens avant-arrière.

L'équilibre des moments autour du point A donne :

$$\sum M_{/A} = F_E \times x_E + F_T \times x_T - B_x \times z_B = 0 \quad (5)$$

ou

$$\sum M_{/A} = (F_E + F_T) \times CDG_{av-arr} - B_x \times z_B = 0 \quad (6)$$

soit

$$CDG_{av-arr} = \frac{B_x \times z_B}{F_E + F_T} \quad (7)$$

avec

$$A_z = F_E + F_T = R_{1z} + R_{2z} \quad (8)$$

et
$$B_x = R_{3x} + R_{4x} \quad (9)$$

et
$$z_B = L_E \times \sin(\alpha) \quad (10)$$

donc
$$CDG_{av-arr} = \frac{(R_{3x} + R_{4x}) \times L_E \times \sin(\alpha)}{R_{1z} + R_{2z}} \quad (11)$$

A.II.II $CDG_{gch-dte}$

Lorsque le travailleur est à peu près aligné entre les montants (friction latérale nulle au sommet de l'échelle), l'équilibre statique des forces en deux dimensions donne le DCL présenté à la Figure 90.

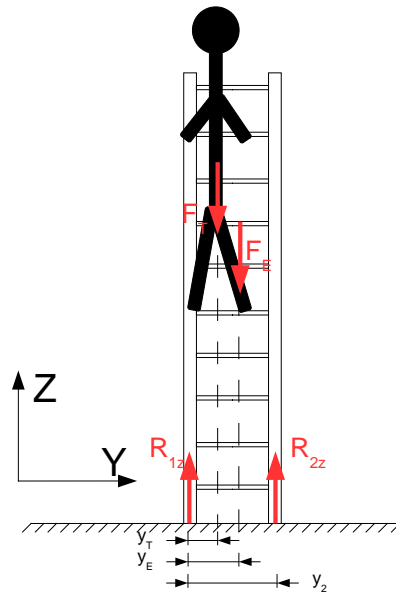


Figure 90. Diagramme de corps libre pour le système échelle-travailleur dans le sens gauche-droite, travailleur au repos.

L'équilibre des moments autour du point 1 donne :

$$\sum M_{/1} = -F_E \times y_E - F_T \times y_T + R_{2z} \times y_2 = 0 \quad (12)$$

ou
$$\sum M_{/1} = CDG_{gch-dte}(R_{1z} + R_{2z}) + R_{2z} \times y_2 = 0 \quad (13)$$

donc

$$CDG_{gch-dte} = \frac{R_{2z} \times y_2}{R_{1z} + R_{2z}} \quad (14)$$

La valeur d'équilibre parfait doit correspondre à la moitié de la distance entre les montants, soit 222 mm environ.

Lorsque le travailleur se penche sur le côté, l'équation d'équilibre des moments devient (avec la friction latérale au sommet, et en supposant que le travailleur est en équilibre sur ses pieds, donc pas de forces horizontales aux pieds et aux mains; Figure 91) :

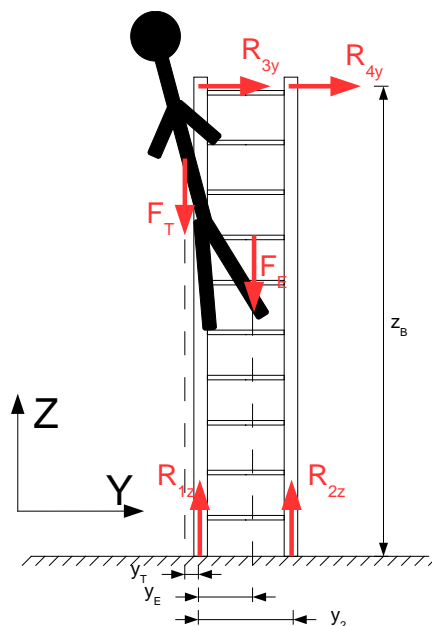


Figure 91. Diagramme de corps libre pour le système échelle-travailleur dans le sens gauche-droite, travailleur penché sur le côté.

L'équilibre des moments autour du point 1 donne :

$$\sum M_{/1} = -F_E \times y_E - F_T \times y_T + R_{2z} \times y_2 - (R_{3y} + R_{4y}) \times z_B = 0 \quad (15)$$

La friction latérale au sommet vient donc générer un moment, qui permet d'équilibrer le système lorsque le travailleur se penche sur le côté de l'échelle. L'évaluation du CDG gauche-droite par l'équation (15) devient donc « qualitative » lorsque l'expérimentateur se penche sur le côté, et représente la position du CDG du système en prenant en compte la friction au sommet de l'échelle.

La friction latérale au sommet a une valeur maximale $(R_{3y} + R_{4y})_{max}$ pour une surface d'appui en acier égale à :

$$(R_{3y} + R_{4y})_{max} = (R_{3x} + R_{4x}) \times COF = (R_{3x} + R_{4x}) \times 0,412 \quad (16)$$

En d'autres termes, plus le travailleur va être haut sur l'échelle, plus la friction latérale mobilisable sera importante (car $R_{3x} + R_{4x}$ sera plus grand), et moins le risque de glissement au sommet sera élevé.

Il y a donc deux facteurs impliqués dans la stabilité latérale de l'échelle (glissement au sommet) :

1. La position du CDG gauche-droite : plus celle-ci est proche de 0, plus le risque de glissement au sommet est élevé : la friction latérale au sommet n'est pas en mesure d'apporter suffisamment de résistance pour conserver une charge significative sur R_{2z} . Ceci est surtout problématique dans les échelons du bas de l'échelle, lorsque la friction latérale au sommet est faible (car la réaction horizontale au sommet de l'échelle $R_{3x} + R_{4x}$ est faible);
2. La demande en friction latérale maximale, qui est limitée par le coefficient de friction du matériau.

A.III Évaluation de la position des CDG pour les escabeaux

A.III.1 CDG av-arr

Pour un travailleur au repos sur un escabeau, l'équilibre statique des forces en deux dimensions donne le DCL présenté à la Figure 92.

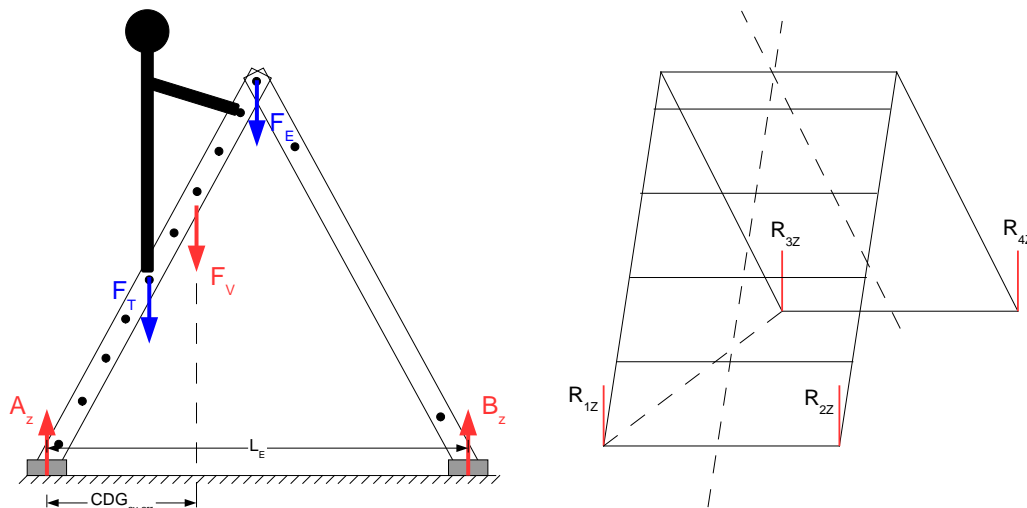


Figure 92. Diagramme de corps libre pour le système escabeau-travailleur dans le sens avant-arrière.

L'équilibre des moments autour du point A donne :

$$\sum M_{/A} = F_V \times CDG_{av-arr} - B_Z \times L_E = 0 \tag{17}$$

avec $F_E + F_T = F_V$ (18)

soit $CDG_{av-arr} = \frac{B_Z \times L_E}{F_V}$ (19)

et $\sum F_Y = -F_V + A_Z + B_Z = 0$ (20)

soit $F_V = A_Z + B_Z = R_{1z} + R_{2z} + R_{3z} + R_{4z}$ (21)

et $B_Z = R_{3z} + R_{4z}$ (22)

donc $CDG_{av-arr} = \frac{R_{3z} + R_{4z} \times L_E}{R_{1z} + R_{2z} + R_{3z} + R_{4z}}$ (23)

A.III.II CDG_{gch-dte}

Lorsque le travailleur se penche sur le côté, l'équilibre statique des forces en deux dimensions donne le DCL présenté à la Figure 93.

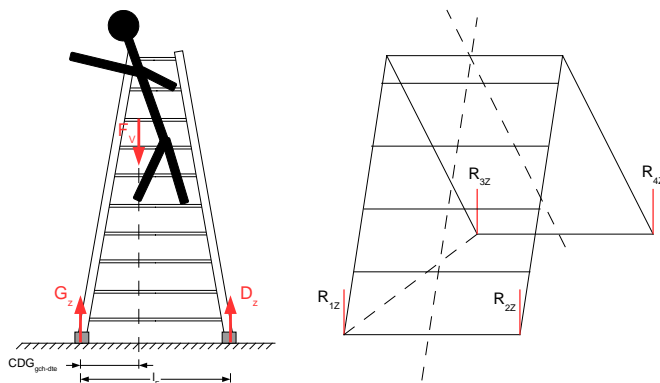


Figure 93. Diagramme de corps libre pour le système escabeau-travailleur dans le sens gauche-droite.

L'équilibre des moments autour du point G donne :

$$\sum M_{/G} = F_V \times CDG_{gch-dte} - D_Z \times l_E = 0 \quad (24)$$

soit
$$CDG_{gch-dte} = \frac{D_Z \times l_E}{F_V} \quad (25)$$

et
$$\sum F_Y = -F_V + G_Z + D_Z = 0 \quad (26)$$

soit
$$F_V = G_Z + D_Z = R_{1z} + R_{2z} + R_{3z} + R_{4z} \quad (27)$$

et
$$D_Z = R_{2z} + R_{4z} \quad (28)$$

donc
$$CDG_{gch-dte} = \frac{R_{2z} + R_{4z} \times l_E}{R_{1z} + R_{2z} + R_{3z} + R_{4z}} \quad (29)$$

Avec l_E qui vaut 809 mm pour l'escabeau de 12 pieds, et 547 mm pour celui de 6 pieds.

ANNEXE B: DÉVELOPPEMENT DES MODÈLES ANALYTIQUES

Cette annexe présente les modèles analytiques pour évaluer la position des CDG des systèmes échelle-travailleur, en fonction du poids du travailleur, de sa position et de sa hauteur sur l'échelle.

B.1 Notations

Dans cette annexe, les notations suivantes sont utilisées.

α	L'angle de l'échelle ou de l'escabeau par rapport au sol
β	L'angle du travailleur par rapport à la verticale
A_z	La réaction verticale à l'appui A
B_x	La réaction horizontale du mur, au sommet de l'échelle
B_z	La réaction verticale à l'appui B
CDG_{av-arr}	La distance horizontale entre le CDG du système échelle-travailleur et l'appui A
$CDG_{gch-dte}$	La distance horizontale entre le CDG du système échelle-travailleur et le montant de gauche de l'échelle ou de l'escabeau
F_E	Le poids de l'échelle (ou de l'escabeau), concentré en son CDG
F_T	Le poids du travailleur, concentré en son CDG
F_{TM}	La force horizontale exercée par les mains du travailleur sur l'échelle ou l'escabeau
F_{TP}	La force horizontale exercée par les pieds du travailleur sur l'échelle ou l'escabeau
F_V	La force verticale totale du système travailleur escabeau, dans le sens de la gravité
H_{cdgT}	La distance du CDG du travailleur par rapport à ses pieds (0,57 fois la taille du travailleur)
L_E	La longueur de l'échelle (ou de l'escabeau)
l_E	La largeur de l'escabeau
N_E	Le numéro d'échelon de l'échelle (1 étant le plus près du sol)
x_{cdgP}	La distance horizontale entre le CDG du travailleur et ses pieds
x_{cdgT}	La distance horizontale entre le CDG du travailleur et l'appui A

x_E	La distance horizontale entre l'appui A et le CDG de l'échelle, selon l'axe X
x_T	La distance horizontale entre l'appui A et le CDG du travailleur, selon l'axe X
z_B	La hauteur du point d'appui de l'échelle au mur, par rapport au pied de l'échelle
z_P	La hauteur des pieds du travailleur par rapport au pied de l'échelle ou de l'escabeau

B.II Équilibre des forces pour une échelle

B.II.I Échelle seule

En supposant que le poids de l'échelle soit uniformément réparti, le CDG de l'échelle se trouve à une distance :

$$CDG_{av-arr} = \frac{L_E}{2} \times \cos(\alpha) \quad (30)$$

Avec : L_E la longueur de l'échelle et α l'angle de l'échelle par rapport au sol.

B.II.II Expérimentateur au repos

Afin de simplifier les équations d'équilibre, dans un premier temps, l'hypothèse suivante est considérée :

- H1 L'expérimentateur a son CDG parfaitement à la verticale au-dessus de l'échelon sur lequel ses pieds sont appuyés.

L'hypothèse H1 semble néanmoins être en contradiction avec le travailleur représenté sur la Figure 94, où celui-ci semble être incliné de quelques degrés en arrière (l'angle a été évalué à 7° à l'aide d'un logiciel de dessin technique). L'angle pour le CDG de l'expérimentateur sera plus faible en réalité, car les bras sont positionnés en avant, et non le long du corps. Une différence est donc attendue entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées par la méthode analytique présentée dans cette section avec l'hypothèse H1.

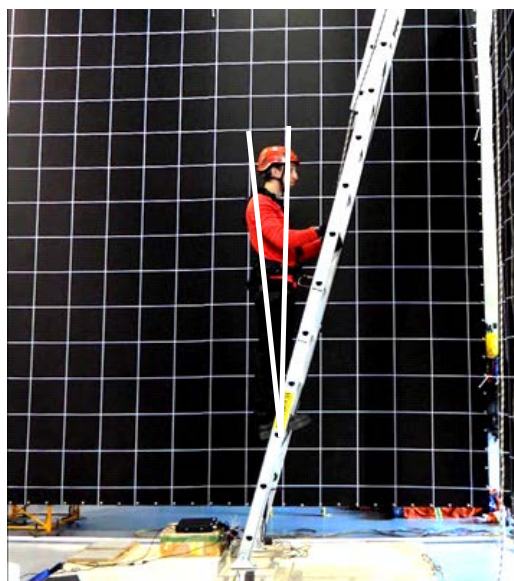


Figure 94. Expérimentateur dans la position de repos avant de débiter la séquence de mouvements.

Pour un travailleur au repos, l'équilibre statique des forces en deux dimensions donne le diagramme de corps libre (DCL) présenté à la Figure 95.

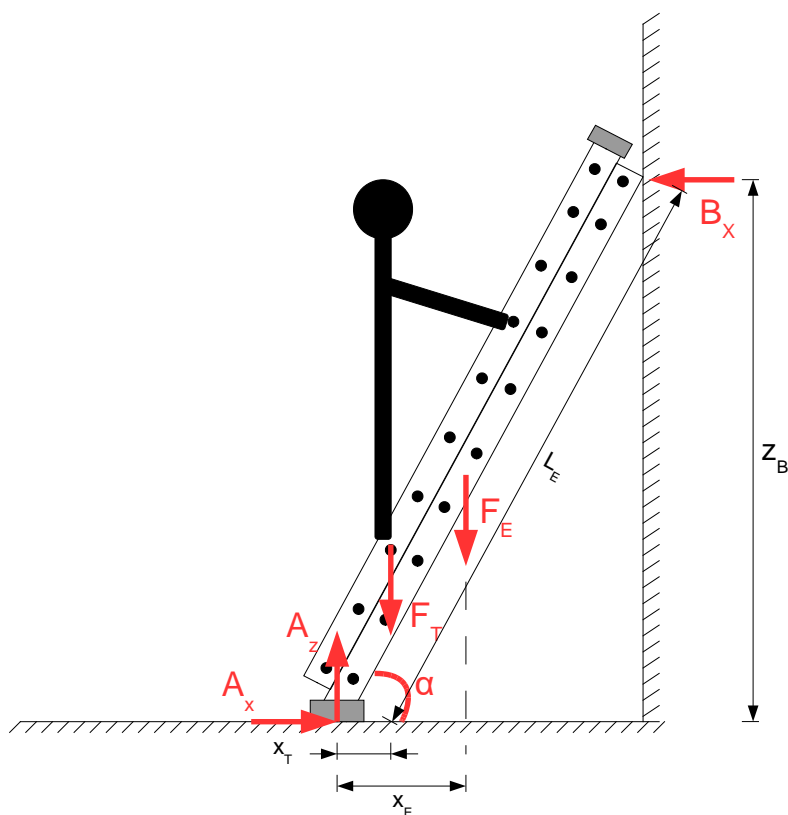


Figure 95. Diagramme de corps libre du système pour le travailleur au repos.

L'équilibre des moments autour du point A donne :

$$\sum M_{/A} = F_E \times x_E + F_T \times x_T - B_x \times z_B = 0 \quad (31)$$

soit
$$F_E \times x_E + F_T \times x_T = B_x \times z_B \quad (32)$$

et
$$\sum M_{/A} = (F_E + F_T) \times CDG_{av-arr} - B_x \times z_B = 0 \quad (33)$$

soit
$$CDG_{av-arr} = \frac{B_x \times z_B}{F_E + F_T} \quad (34)$$

donc
$$CDG_{av-arr} = \frac{F_E \times x_E + F_T \times x_T}{F_E + F_T} \quad (35)$$

Avec
$$x_E = \frac{L_E}{2} \times \cos(\alpha) \quad (36)$$

et
$$x_T = (N_E \times 0,305 - 0,152) \times \cos(\alpha) \quad (37)$$

Car l'échelle non déployée, qui mesure 12 pieds de long, comprend 12 échelons espacés de 1 pied (0,305 m) et il reste un demi-pied à chaque extrémité (0,152 m). Ainsi, lorsque le travailleur a ses pieds sur le 3^e échelon, il se trouve à une distance horizontale x_T de l'appui A :

$$x_T = (3 \times 0,305 - 0,152) \times \cos(\alpha) \quad (38)$$

Au final, en substituant les équations (36) et (37) dans l'équation (35), on obtient :

$$CDG_{av-arr} = \frac{F_E \times \frac{L_E}{2} \times \cos(\alpha) + F_T \times (N_E \times 0,305 - 0,152) \times \cos(\alpha)}{F_E + F_T} \quad (39)$$

B.II.III Expérimentateur dans les positions P1 et P3

Dans la position P1, l'angle d'inclinaison du travailleur par rapport à la verticale a été évalué à 16 ° environ à l'aide d'un logiciel de dessin technique (Figure 96).

Afin de simplifier un peu les équations d'équilibre, l'hypothèse suivante est considérée :

- H2 Les bras de l'opérateur sont à l'horizontale, et appliquent donc une force parfaitement horizontale sur le l'échelon.



Figure 96. Expérimentateur dans la position P1.

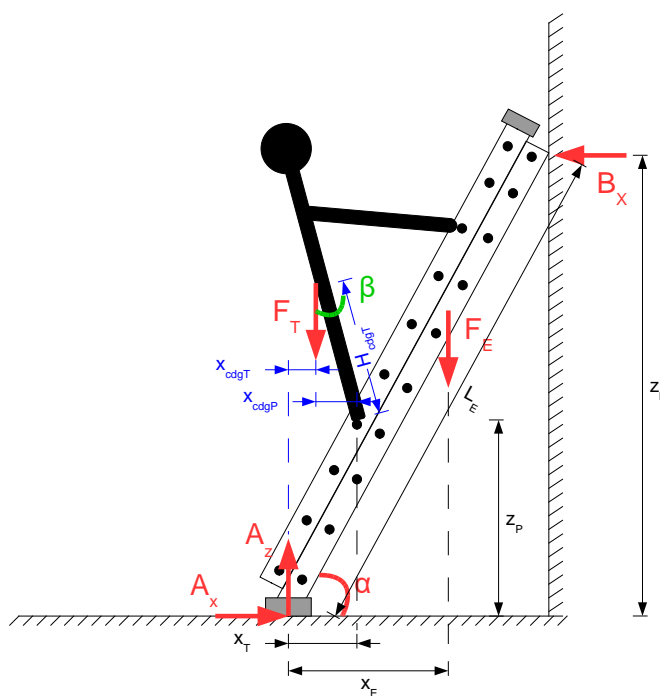


Figure 97. Diagramme de corps libre du système pour le travailleur dans la position P1.

L'équilibre des moments autour de l'appui A pour le système complet donne :

$$\sum \mathbf{M}_{/A} = -\mathbf{F}_E \times \mathbf{x}_E - \mathbf{F}_T \times \mathbf{x}_{cdgT} + \mathbf{B}_x \times \mathbf{z}_B = \mathbf{0} \quad (40)$$

avec
$$\mathbf{x}_{cdgT} = \mathbf{x}_T - \mathbf{x}_{cdgP} \quad (41)$$

soit
$$\sum \mathbf{M}_{/A} = -\mathbf{F}_E \times \mathbf{x}_E - \mathbf{F}_T \times (\mathbf{x}_T - \mathbf{x}_{cdgP}) + \mathbf{B}_x \times \mathbf{z}_B = \mathbf{0} \quad (42)$$

Le CDG_{av-arr} du système complet s'obtient donc par l'équation (en réutilisant l'équation 34) :

$$CDG_{av-arr} = \frac{\mathbf{F}_E \times \mathbf{x}_E + \mathbf{F}_T \times (\mathbf{x}_T - \mathbf{x}_{cdgP})}{\mathbf{F}_E + \mathbf{F}_T} \quad (43)$$

avec
$$\mathbf{x}_E = \frac{L_E}{2} \times \cos(\alpha) \quad (44)$$

et
$$\mathbf{x}_T = (N_E \times \mathbf{0}, 305 - \mathbf{0}, 152) \times \cos(\alpha) \quad (45)$$

et
$$\mathbf{x}_{cdgP} = H_{cdgT} \times \sin(\beta) \quad (46)$$

Au final, en substituant les équations (44), (45) et (46) dans l'équation (43), on obtient :

$$CDG_{av-arr} = \frac{\mathbf{F}_E \times \frac{L_E}{2} \times \cos(\alpha) + \mathbf{F}_T \times [(N_E \times \mathbf{0}, 305 - \mathbf{0}, 152) \times \cos(\alpha) - H_{cdgT} \times \sin(\beta)]}{\mathbf{F}_E + \mathbf{F}_T} \quad (47)$$

Dans la position P3, l'angle d'inclinaison du buste du travailleur par rapport à la verticale a été évalué à 12 ° environ à l'aide d'un logiciel de dessin technique (Figure 98). L'équation (47) est valable également pour la position P3, toujours en considérant l'hypothèse H2. Dans ce cas, le fait que le travailleur ait un bras de part et d'autre de son CDG, devrait donner un angle β plus important que celui estimé à l'aide de la photo.



Figure 98. Expérimentateur dans la position P3.

B.II.IV Expérimentateur dans la position P2

Dans la position P2, l'angle d'inclinaison du travailleur par rapport à l'axe de symétrie de l'échelle a été évalué à 14.5 ° environ à l'aide d'un logiciel de dessin technique (Figure 99).

Estimer la position du $CDG_{gch-dte}$ est très compliqué dans le cas de la position P2. En effet, il faudrait pour cela connaître les réactions horizontales R_{3y} et R_{4y} , or en utilisant le COF et la réaction B_x du mur, on ne peut qu'estimer la valeur maximale de ces réactions horizontales et non pas les valeurs inférieures à ce maximum théorique. En conséquence, aucune comparaison des valeurs théoriques et expérimentales ne sera faite pour la position P2, et l'étude paramétrique se concentrera sur les positions P1 et P3.



Figure 99. Expérimentateur dans la position P2.

B.III Équilibre des forces pour un escabeau

B.III.I Escabeau seul

En supposant que le poids de l'escabeau soit uniformément réparti, le CDG_{av-arr} théorique de l'escabeau se trouve environ à une distance :

$$CDG_{av-arr} = \frac{L_E}{2} \quad (48)$$

Avec : L_E la longueur de l'escabeau.

Un écart est attendu, car les échelons sont situés juste d'un côté de l'escabeau. L'écart sera sans doute plus marqué pour l'escabeau de 12 pieds que pour celui de 6 pieds (car le premier comporte plus d'échelons).

Pour ce qui est du $CDG_{gch-dte}$, sa position théorique se trouve environ à une distance :

$$CDG_{gch-dte} = \frac{l_E}{2} \quad (49)$$

Avec : l_E la largeur de l'escabeau.

B.III.II Expérimentateur au repos

Afin de simplifier les équations d'équilibre, dans un premier temps, l'hypothèse H1 est considérée à nouveau. Comme dans le cas de l'échelle, il est probable que l'expérimentateur soit incliné de quelques degrés en arrière. Une légère différence est donc attendue entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées par la méthode analytique présentée dans cette section avec l'hypothèse H1.

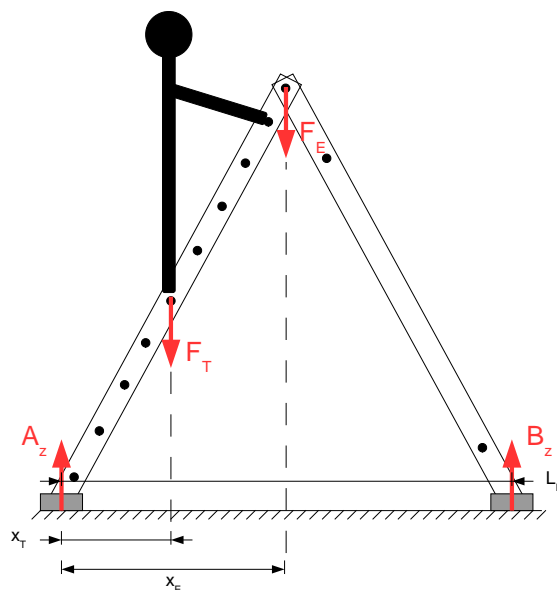


Figure 100. Diagramme de corps libre pour le travailleur au repos sur l'escabeau.

L'équilibre de moments au point A donne :

$$\sum M_{/A} = F_E \times x_E + F_T \times x_T - B_z \times L_E = 0 \quad (50)$$

soit
$$F_E \times x_E + F_T \times x_T = B_z \times L_E \quad (51)$$

et
$$\sum M_{/A} = (F_E + F_T) \times CDG_{av-arr} - B_z \times L_E = 0 \quad (52)$$

soit
$$CDG_{av-arr} = \frac{B_z \times L_E}{F_E + F_T} \quad (53)$$

ou
$$CDG_{av-arr} = \frac{F_E \times x_E + F_T \times x_T}{F_E + F_T} \quad (54)$$

avec
$$x_E = \frac{L_E}{2} \quad (55)$$

et
$$x_T = N_E \times 0,305 \times \cos(\alpha) \quad (56)$$

d'où
$$CDG_{av-arr} = \frac{F_E \times \frac{L_E}{2} + F_T \times N_E \times 0,305 \times \cos(\alpha)}{F_E + F_T} \quad (57)$$

L'angle α est de 74° lorsque l'escabeau de 12 pieds est ouvert, considérant les dimensions suivantes : 3478 mm de haut une fois ouvert, et base de 1975 mm. Dans le cas de l'escabeau de 6 pieds, l'angle α est de $72,5^\circ$: 1726 mm de haut une fois ouvert et base de 1087 mm.

B.III.III Expérimentateur dans les positions P1 et P3

Afin de simplifier un peu les équations d'équilibre, l'hypothèse H2 est considérée à nouveau.

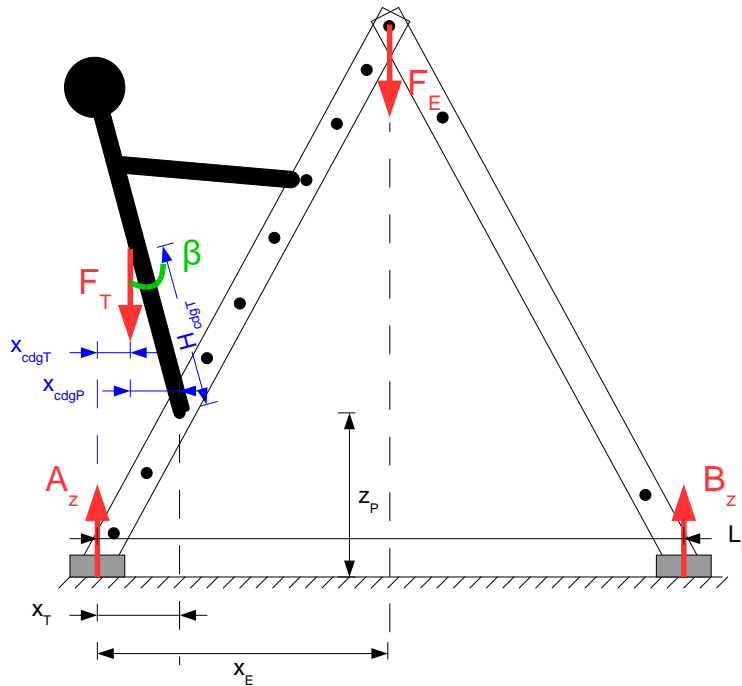


Figure 101. Diagramme de corps libre pour le travailleur en position P1 sur l'escabeau.

L'équilibre de moments au point A donne :

$$\sum M_{/A} = F_E \times x_E + F_T \times x_{cdgT} + -B_z \times L_E = 0 \quad (58)$$

Les équations (50) à (53) pour l'équilibre du travailleur sont encore valides, et on a donc :

$$\sum \mathbf{M}_{/A} = -\mathbf{F}_E \times \mathbf{x}_E - \mathbf{F}_T \times \mathbf{x}_{cdgT} + \mathbf{B}_x \times \mathbf{z}_B = \mathbf{0} \quad (59)$$

Le CDG_{av-arr} du système complet s'obtient donc par l'équation :

$$CDG_{av-arr} = \frac{\mathbf{F}_E \times \mathbf{x}_E + \mathbf{F}_T \times (\mathbf{x}_T - \mathbf{x}_{cdgP})}{\mathbf{F}_E + \mathbf{F}_T} \quad (60)$$

avec
$$\mathbf{x}_E = \frac{L_E}{2} \quad (61)$$

et
$$\mathbf{x}_T = N_E \times 0,305 \times \cos(\alpha) \quad (62)$$

et
$$\mathbf{x}_{cdgP} = H_{cdgT} \times \sin(\beta) \quad (63)$$

Au final, en substituant les équations (61), (62) et (63) dans l'équation (60), on obtient :

$$CDG_{av-arr} = \frac{\mathbf{F}_E \times \frac{L_E}{2} + \mathbf{F}_T \times (N_E \times 0,305 \times \cos(\alpha) - H_{cdgT} \times \sin(\beta))}{\mathbf{F}_E + \mathbf{F}_T} \quad (64)$$

L'équation (64) est valable également pour la position P3, toujours en considérant l'hypothèse H2.

B.III.IV Expérimentateur dans la position P2

En première approximation, les forces horizontales en pied (F_{TP}) et à la main droite (F_{TM}) sont ignorées. Une autre simplification est de considérer que l'expérimentateur a les pieds positionnés au centre de l'escabeau. Cette hypothèse est probablement vérifiée pour les échelons en hauteur, étant donné que les montants de l'escabeau sont convergents, mais pour les échelons du bas, cela pourrait être différent de la réalité.

Dans le cas de E1, ESC12, l'angle γ a été évalué à 13 ° environ sur les échelons supérieurs et autour de 24 ° pour les échelons inférieurs (plus de place pour les pieds et se pencher sur le côté). Dans le cas de E2, ESC6, l'angle maximal atteint lors de la perte de stabilité est estimé à 18 ° environ.

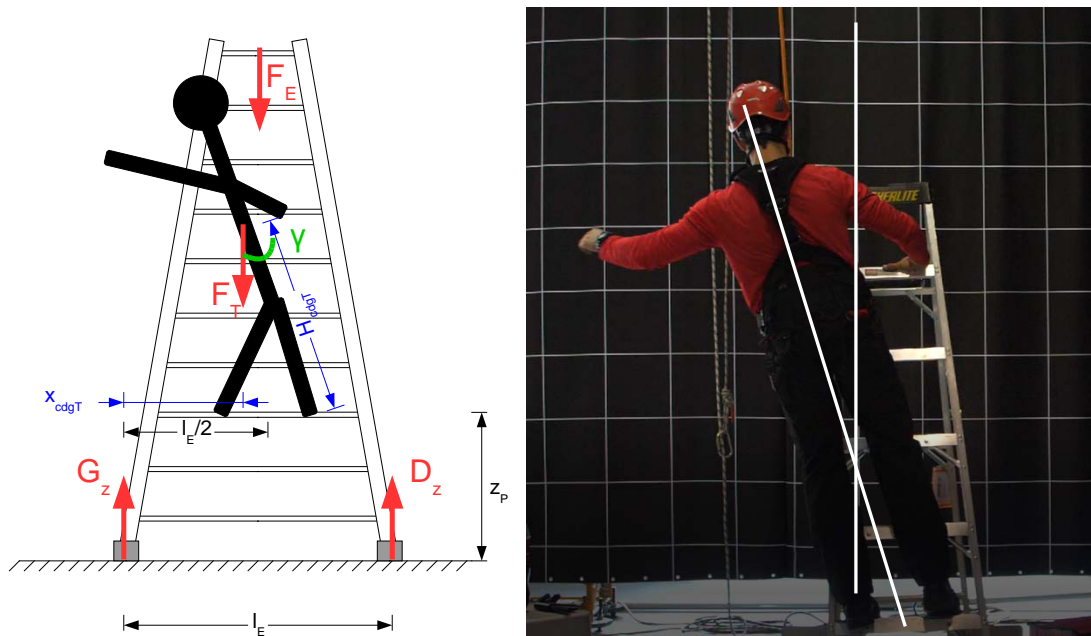


Figure 102. Diagramme de corps libre pour le travailleur en position P2 sur l'escabeau.

L'équilibre des moments au point G donne :

$$\sum M_{/G} = -F_E \times \frac{l_E}{2} - F_T \times x_{cdgT} + D_z \times l_E = 0 \quad (65)$$

$$CDG_{gch-dte} = \frac{F_E \times x_E + F_T \times x_{cdgT}}{F_E + F_T} \quad (66)$$

avec
$$x_E = \frac{l_E}{2} \quad (67)$$

et
$$x_{cdgT} = \frac{l_E}{2} - H_{cdgT} \times \sin(\gamma) \quad (68)$$

et
$$CDG_{gch-dte} = \frac{F_E \times \frac{l_E}{2} + F_T \times \left(\frac{l_E}{2} - H_{cdgT} \times \sin(\gamma) \right)}{F_E + F_T} \quad (69)$$

B.III.V Limite de force latérale

Une simplification est de considérer que l'expérimentateur a les pieds positionnés au centre de l'escabeau. On considère que la force latérale correspondant à l'effort de traction effectué par le travailleur est entièrement transmise au pied de l'escabeau, sans glissement.

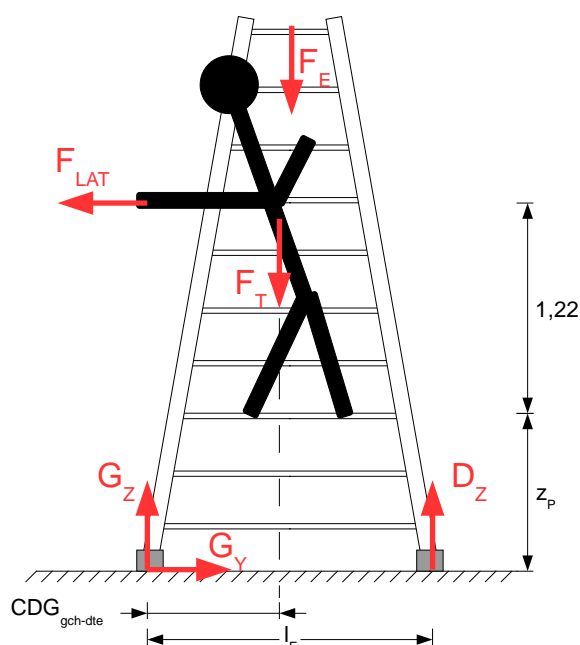


Figure 103. Diagramme de corps libre pour le travailleur appliquant une force latérale.

$$\sum M_{/G} = -F_E \times \frac{l_E}{2} - F_T \times \frac{l_E}{2} + F_{Lat} \times (z_P + 1,22) + D_z \times l_E = 0 \quad (70)$$

soit

$$D_z = \frac{(F_E + F_T) \times \frac{l_E}{2} - F_{Lat} \times (z_P + 1,22)}{l_E} \quad (71)$$

et

$$z_P = N_E \times 0,305 \times \sin(\alpha) \quad (72)$$

donc

$$D_z = \frac{(F_E + F_T) \times \frac{l_E}{2} - F_{Lat} \times (N_E \times 0,305 \times \sin(\alpha) + 1,22)}{l_E} \quad (73)$$

Et F_{lat} maximal est atteint lorsque D_z est nul.

$$(F_E + F_T) \times \frac{l_E}{2} = F_{LatMAX} \times (N_E \times 0,305 \times \sin(\alpha) + 1,22) \quad (74)$$

donc

$$F_{LatMAX} = \frac{(F_E + F_T) \times l_E}{2(N_E \times 0,305 \times \sin(\alpha) + 1,22)} \quad (75)$$

B.IV Valeurs numériques des différents paramètres pour les modèles analytiques

Le Tableau 25 présente les valeurs numériques des différents paramètres fixes relatifs aux échelles utilisées pour l'étude paramétrique, et le Tableau 26 ceux des escabeaux. Le Tableau 27 présente les valeurs numériques des différents paramètres fixes relatifs aux expérimentateurs ou travailleurs fictifs utilisés pour l'étude paramétrique.

Tableau 25. Valeurs des différents paramètres des échelles pour les modèles analytiques

Paramètres	Modèles d'échelles						
	Aluminium		Aluminium			Fibre de verre	
Taille nominale	8"	16"	12"	24"	24"	24"	24"
Télescopique	Non	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
Déployée	Non	Non	Non	Non	Oui	Non	Oui
F_E	58 N	129 N	85 N	190 N	190 N	238 N	238 N
L_E	2,49 m	2,49 m	3,66 m	3,66 m	6,55 m	3,66 m	6,55 m

Tableau 26. Valeurs des différents paramètres des escabeaux pour les modèles analytiques

Paramètres	Modèles d'escabeaux			
	Aluminium		Fibre de verre	
Taille nominale	6'	12'	6'	12'
α	72,5 °	74 °	72,5 °	74 °
F_E	80 N	198 N	94 N	222 N
L_E	1087 mm	1975 mm	1087 mm	1975 mm
l_E	547 mm	809 mm	547 mm	809 mm

Tableau 27. Valeurs des différents paramètres relatifs aux expérimentateurs pour les modèles analytiques

Paramètres	Expérimentateurs			Travailleurs fictifs		
	E1	E2	E2 + WV	T1	T2	T3
Taille	1,82 m	1,75 m	1,75 m	1,6 m	1,7 m	2,0 m
H_{cdqT}	1,038 m	0,998 m	0,998 m	0,912 m	0,969 m	1,140 m
F_T	922 N	730 N	955 N	490 N	1373 N	1373 N