

Prévention des risques mécaniques et physiques

Études et recherches

RAPPORT R-902



Conception des cordes d'assurance horizontales pour la protection contre les chutes de hauteur Mise à jour du guide technique (Version corrigée)

*Bertrand Galy
André Lan*



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.

NOS RECHERCHES

travaillent pour vous !

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 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 CSST. Abonnement : <https://abonnement.lacsst.com/prevention>

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec
2016
ISBN : 978-2-89631-882-7 (PDF)
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications
et de la valorisation de la recherche
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
Mai 2016

Prévention des risques mécaniques et physiques

Études et recherches

RAPPORT R-902

Conception des cordes d'assurance horizontales pour la protection contre les chutes de hauteur Mise à jour du guide technique

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.

Bertrand Galy, André Lan

IRSST

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca



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 :

- L'équipe technique du Groupe de recherche en génie des structures de l'École Polytechnique de Montréal pour sa contribution au programme expérimental;
- Computers and Structure pour nous avoir offert l'accès à une licence « recherche » pour leur logiciel SAP2000;
- Bertrand Gauthier, Confédération des syndicats nationaux, Construction;
- Simon Lévesque, Fédération des travailleurs et travailleuses du Québec, Construction;
- Isabelle Dugré, Association paritaire pour la santé et la sécurité du travail du secteur de la construction;
- Martin Lemieux, Syndicat Québécois de la Construction;
- Pierre-Luc Labelle, Commission de la santé et de la sécurité du travail;
- Stéphane Desjardins, Association des professionnels de la construction et de l'habitation du Québec;
- Yohann Aubé, Gestion d'entreprise en santé et en sécurité (GESTESS).

SOMMAIRE

Les chutes de hauteur sont encore aujourd'hui une des causes majeures d'accidents du travail. Trop souvent, les travailleurs ne s'attachent pas, faute de point d'ancrage disponible, ou parce qu'ils trouvent que les points d'attache fixes restreignent trop leurs mouvements. Cette restriction peut toutefois être levée grâce aux systèmes de corde d'assurance horizontale (SCAH). Le présent rapport constitue la mise à jour du guide technique T-18 publié en 1991¹ et rend ce dernier caduc. Cette mise à jour était devenue nécessaire à la suite de l'introduction, en 2001, au Code de sécurité pour les travaux de construction (CSTC), de l'obligation d'équiper les cordons d'assujettissement d'un absorbeur d'énergie. De plus, puisque les ancrages des SCAH sont généralement flexibles, plutôt que rigides (une colonne structurale est un exemple d'ancrage rigide), il nous est apparu important d'en tenir compte dans la présente mise à jour. Ce rapport s'adresse principalement à des ingénieurs responsables de la conception des SCAH.

Un bref inventaire des méthodes analytiques existantes est présenté en début de document. Il apparaît que les méthodes proposées sont trop complexes ou qu'elles ignorent la flexibilité des ancrages. La méthode analytique proposée dans ce rapport est suffisamment simple pour être facilement programmée dans un tableur Excel, tout en prenant en compte la rigidité des ancrages. Pour les besoins de l'étude, la version du logiciel Excel utilisée comprenait des fonctions macros en Visual Basic (Visual Basic for Applications, VBA). Par ailleurs, une méthode de conception pour les câbles à travées multiples est proposée, alors qu'elle était absente du guide de 1991. Des abaques de calcul similaires à ceux présentés dans le guide précédent sont suggérés pour des câbles de 9,5 mm et 12,7 mm de diamètre. Enfin, un bref rappel est fait sur la méthode de calcul du dégagement nécessaire.

La méthode analytique présentée dans ce guide a fait l'objet d'une double validation : d'une part, par des essais dynamiques de chute et, d'autre part, par des simulations réalisées à l'aide d'un logiciel de structure (SAP2000). La campagne d'essais dynamiques de chute comprenait 42 tests où l'influence de plusieurs paramètres a été étudiée : portée, flexibilité des ancrages, diamètre du câble, flèche initiale. Comme attendu, on a observé expérimentalement que plus la rigidité de l'ancrage augmentait, plus la tension dans le câble était grande. Les résultats expérimentaux se comparent bien avec ceux de la méthode analytique simple intégrée dans le tableur. Celle-ci est par ailleurs plutôt conservatrice, aussi bien pour la tension que pour la flèche; elle peut donc être utilisée pour faire une conception sécuritaire des SCAH.

Des simulations numériques statiques et dynamiques ont été réalisées afin de reproduire les essais faits en laboratoire. L'écart entre les simulations numériques statiques non linéaires et celles du modèle analytique simple est très faible. La méthode analytique simple mise en œuvre avec Excel dans le tableur est donc très efficace et le passage à un modèle numérique statique n'apporte pas d'avantage significatif. Les résultats de la méthode analytique ont aussi été comparés à ceux du modèle numérique pour des essais non réalisés en laboratoire : absorbeur d'énergie gelé, SCAH à travées multiples. Le modèle analytique simple a donné des résultats tout à fait acceptables pour les câbles à travées multiples. Quant au modèle numérique

¹ Arteau, J. et A. Lan. 1991. Guide Technique Protection contre les chutes de hauteur - Conception de câbles de secours horizontaux. Coll. « Études et Recherches / Guide Technique », Rapport T-18, IRSST.

dynamique, il estime fidèlement la tension et la flèche mesurées au laboratoire. L'intérêt d'une analyse dynamique est donc relativement limité comparativement à une analyse statique compte tenu du faible écart entre les résultats obtenus avec ces deux types d'analyse.

Enfin, le rapport montre qu'il est possible de programmer la méthode de calcul analytique dans un tableur Excel et d'y incorporer divers programmes de sécurité afin d'éviter des erreurs. Le tableur est également équipé d'une fonction de validation des ancrages flexibles qui correspond à la méthode de conception imposée par le Code de sécurité pour les travaux de construction (CSTC). Le tableur a été converti en un outil web, plutôt convivial, permettant à un utilisateur de déterminer la flèche, la tension dans le câble et les sections des potelets d'ancrage d'un SCAH en une minute environ, ce qui est nettement plus rapide que l'utilisation d'un logiciel de structure avancé et coûteux.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	I
SOMMAIRE	III
1. INTRODUCTION.....	1
1.1 Problématique de santé et de sécurité du travail.....	1
1.1.1 Chutes de hauteur.....	1
1.1.2 Protection contre les chutes à l'aide d'un SCAH.....	1
1.2 Conception des SCAH	2
1.2.1 Aspect normatif et réglementaire.....	2
1.2.2 Étude des câbles sous chargement dynamique	4
1.2.3 Méthode analytique simple pour la conception	4
1.3 Objectifs.....	6
1.4 Méthodologie	6
1.5 Organisation du rapport	7
2. MÉTHODE ANALYTIQUE SIMPLE.....	9
2.1 Méthodes analytiques proposées dans la littérature.....	9
2.2 Mise en équation	10
2.2.1 Hypothèses de calcul.....	10
2.2.2 Ancrages infiniment rigides	11
2.2.3 Ancrages flexibles.....	12
2.3 Influence des paramètres sur la réponse du SCAH.....	13
2.3.1 Effets de la portée, de la tension initiale et de la FAM.....	13
2.3.2 Effet du diamètre du câble	14
2.3.3 Effet de la rigidité des ancrages	15
2.3.4 Travées multiples	16
2.4 Abaques de calcul pour ancrages rigides.....	17
2.5 Calcul du dégagement.....	24
3. CAMPAGNE D'ESSAIS DYNAMIQUES DE CHUTE	25
3.1 Protocole expérimental.....	25
3.1.1 Matrice des essais	26

3.1.2	Choix des potelets, vérification de la résistance	27
3.2	Montage pour les essais dynamiques de chute	29
3.2.1	Estimation du dégagement nécessaire	31
3.2.2	Colonnes d'ancrage.....	31
3.2.3	Fixation des potelets	32
3.2.4	Fixation du câble aux potelets.....	34
3.3	Essais dynamiques de chute	35
3.3.1	Matériel.....	35
3.3.2	Instrumentation	36
3.3.3	Dissipation d'énergie durant les essais	40
3.4	Résultats des essais.....	43
3.4.1	Synthèse des résultats d'essais.....	43
3.4.2	Comparaison des résultats d'essais au tableur	45
3.4.3	Résultats d'essais détaillés	48
4.	ÉTUDE NUMÉRIQUE	53
4.1	Choix d'un logiciel d'analyse	53
4.2	Modèle numérique	54
4.3	Analyse statique	56
4.3.1	Comparaison avec le tableur.....	56
4.3.2	Influence de l'emplacement de la charge.....	58
4.3.3	SCAH à travées multiples.....	59
4.3.4	Câble synthétique.....	62
4.4	Analyse dynamique.....	63
5.	TABLEUR DE CALCUL	71
5.1	Principe de fonctionnement	71
5.2	Validation et sécurité du tableur Excel.....	71
6.	CONCLUSION.....	73

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 - Méthodes analytiques de calcul pour les SCAH.....	9
Tableau 2 - Influence du diamètre du câble sur la CAM (écart T, en %), en fonction de f_1 et L. .	14
Tableau 3 - Influence du diamètre du câble sur la flèche (écart f_2 , en %), en fonction de f_1 et L. .	14
Tableau 4 - Caractéristiques des câbles.	17
Tableau 5 - Matrice des essais.	26
Tableau 6 - Caractéristiques des câbles.	27
Tableau 7 - Caractéristiques des potelets.....	27
Tableau 8 - Vérification de la résistance en flexion des potelets.....	29
Tableau 9 - Dégagements nécessaires pour les essais dynamiques de chute.....	31
Tableau 10 - Dimensions du boulon à œil.	34
Tableau 11 - Comparaison des CAM et des flèches mesurées à celles calculées à l'aide de la méthode analytique simple.	46
Tableau 12 - Comparaison des CAM et des flèches mesurées à celles calculées à l'aide de la méthode analytique simple (FAM = 4 kN).	47
Tableau 13 - Résultats d'essais dynamiques de chute pour le montage E-1-10.	48
Tableau 14 - Résultats d'essais dynamiques de chute pour le montage E-2-10.	48
Tableau 15 - Résultats d'essais dynamiques de chute pour le montage E-3-10.	49
Tableau 16 - Résultats d'essais dynamiques de chute pour le montage E-4-10.	49
Tableau 17 - Résultats d'essais dynamiques de chute pour le montage E-5-10.	49
Tableau 18 - Résultats d'essais dynamiques de chute pour le montage E-5-15.	49
Tableau 19 - Résultats d'essais dynamiques de chute pour le montage E-R-10.	50
Tableau 20 - Résultats d'essais dynamiques de chute pour le montage E-2-5.	50
Tableau 21 - Résultats d'essais dynamiques de chute pour le montage T1E-2-5.....	50
Tableau 22 - Résultats d'essais dynamiques de chute pour le montage ME-R-10.	51
Tableau 23 - Calcul de la section d'acier du câble.	55
Tableau 24 - Comparaison des résultats obtenus avec le tableur et SAP2000.	57
Tableau 25 - Influence de la position de la charge sur la réponse du câble.....	58
Tableau 26 - Comparaison des résultats du tableur et de SAP2000 pour les SCAH à plusieurs travées.	60
Tableau 27 - Effort et flèche dans le câble pour les différentes configurations.	61
Tableau 28 - Influence d'une portée centrale de longueur variable.....	62

Tableau 29 - Résultats pour un câble synthétique en fonction de ses propriétés mécaniques
(modèle E-2-10).....62

LISTE DES FIGURES

Figure 1 - Cas d'étude simplifiée (statique et symétrique).	5
Figure 2 - Schématisation de la démarche.	6
Figure 3 - Diagramme de corps libre considéré pour les équations.	12
Figure 4 - Ancrage flexible.	13
Figure 5 - Effet de la rigidité des ancrages.	15
Figure 6 - Abaques de la CAM et de la flèche pour une FAM de 4 kN	18
Figure 7 - Abaques de la CAM et de la flèche pour une FAM de 6 kN	19
Figure 8 - Abaques de la CAM et de la flèche pour une FAM de 8 kN	20
Figure 9 - Abaques de la CAM et de la flèche pour une FAM de 4 kN	21
Figure 10 - Abaques de la CAM et de la flèche pour une FAM de 6 kN	22
Figure 11 - Abaques de la CAM et de la flèche pour une FAM de 8 kN	23
Figure 12 - Schéma de principe pour les essais.	25
Figure 13 - Nomenclature utilisée pour désigner les essais dynamiques de chute.	26
Figure 14 - Montage expérimental en laboratoire.	29
Figure 15 - Schéma du montage expérimental, vue de face (haut) et vue du dessus (bas) (échelle non respectée).	30
Figure 16 - Colonne d'ancrage pour les potelets	32
Figure 17 - Mesures pour déterminer la rigidité de chacune des colonnes d'ancrage	32
Figure 18 - Système de fixation des potelets pour les essais.	33
Figure 19 - Plaque d'appui.	34
Figure 20 - Boulon à œil utilisé pour fixer le câble aux potelets.	34
Figure 21 - Tendeur de câble 5/8" x 12" utilisé pour appliquer la flèche initiale	35
Figure 22 - Torse de bois équipé d'un harnais de sécurité et d'un cordon d'assujettissement avec absorbeur d'énergie de classe E4	36
Figure 23 - Cellule de charge de 44,5 kN pour mesurer la tension du câble	37
Figure 24 - Cellule de charge de 22,3 kN pour la tension du cordon d'assujettissement	37
Figure 25 - Potentiomètre à corde.	38
Figure 26 - Point d'attache au câble pour la mesure de la flèche	38
Figure 27 - Flèche du câble d'acier engendrée par une masse suspendue de 100 kg à mi-portée (Tirée de Leclerc et Tremblay, 2015).	39
Figure 28 - Jauges d'extensométrie	39
Figure 29 - Torsion des potelets lors de l'arrêt de chute (E-5-15-B-3).	40

Figure 30 - Courbe hystérétique du potelet (essai E-5-15-B-1).....	41
Figure 31 - Courbe hystérétique de l'absorbeur d'énergie (essai E-5-15-B-1).	42
Figure 32 - Courbe hystérétique du câble (essai E-5-15-B-1).	42
Figure 33 - Charges d'arrêt maximales moyennes pour chaque type d'essais.	44
Figure 34 - Forces d'arrêt maximales moyennes pour chaque type d'essais.....	44
Figure 35 - Flèches maximales moyennes pour chaque type d'essais.....	45
Figure 36 - Chargement appliqué sur le SCAH.	54
Figure 37 - Câble de construction 7x19.....	55
Figure 38 - Déformée sous la charge de 4 kN (statique).	56
Figure 39 - Moments fléchissants (à gauche) et forces axiales (à droite).....	56
Figure 40 - Modèle E-4-10-B pour étudier l'effet de la position de la charge.	58
Figure 41 - Modèle de câble à deux travées de 10 m.....	59
Figure 42 - Modèles de câble à travées multiples irrégulières.....	61
Figure 43 - Modèle avec portée centrale de longueur variable.....	61
Figure 44 - Fonctions de charge enregistrée et idéalisée.	63
Figure 45 - Comparaison des valeurs expérimentales aux résultats de SAP2000, pour l'essai E-2-10-B.....	65
Figure 46 - Comparaison des valeurs expérimentales aux résultats de SAP2000, pour l'essai E-2-5-A.	66
Figure 47 - Comparaison des valeurs expérimentales aux résultats de SAP2000, pour l'essai E-1-10-A.	67
Figure 48 - Comparaison des valeurs expérimentales aux résultats de SAP2000, pour l'essai E-4-10-B.....	68

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ASTM	American society for testing and material
BTP	Bâtiments et travaux publics
CAH	Corde d'assurance horizontale
CAM	Charge d'arrêt maximale (tension maximale dans le câble lors de l'arrêt de chute)
CMU	Charge maximale d'utilisation
CNAMTS	Caisse nationale de l'assurance maladie des travailleurs salariés
CSA	Canadian standard association
CSST	Commission de la santé et de la sécurité du travail
CSTC	Code de sécurité pour les travaux de construction
CTICM	Centre technique industriel de la construction métallique
ÉPI	Équipement de protection individuel
IHSA	Infrastructure Health and Safety Association of Ontario
FAM	Force d'arrêt maximale (tension maximale dans le cordon d'assujettissement lors de l'arrêt de chute)
HHT- α	Hilbert-Hughes-Taylor- α
HSC	Handbook of steel construction
HSS	Hollow structural section
OPPBTP	Organisme professionnel de prévention du bâtiment et des travaux publics
OSHA	Occupational safety and health administration
SCAH	Système de cordes d'assurance horizontales
VBA	Visual Basic for Applications

1. INTRODUCTION

1.1 Problématique de santé et de sécurité du travail

1.1.1 Chutes de hauteur

Parmi les professions les plus touchées par les chutes de hauteur, on compte les travailleurs du bâtiment et des travaux publics (BTP) et les monteurs de charpentes (Alaurent et coll., 1992). La profession de monteur de charpentes est d'ailleurs celle qui présente le plus haut taux de prévalence pour les lésions indemnisées au Québec : 76,1 pour 1000 (Duguay et coll., 2003). En 2009, treize travailleurs sont morts des suites d'une chute de hauteur (21 % des décès au travail), ce qui en fait la troisième cause de décès au travail (Sabourin, 2011). De plus, entre 2009 et 2011, 70 % des arrêts de travail et 58 % des constats d'infraction dans le milieu de la construction sont liés aux chutes de hauteur (Sabourin, 2011). Les chutes à un niveau inférieur sont parmi les 10 premières causes de lésions professionnelles sur la période 2005-2007 (avec une durée moyenne d'absence du travail de 137 jours) et représentent environ 6 000 lésions professionnelles par an (Duguay et coll., 2012). Elles sont également la deuxième cause d'accidents en termes de coûts par année (388 M\$) juste derrière les chutes de même niveau (417 M\$) (Lebeau et coll., 2013).

En France, en 2008, on dénombrait une chute toutes les cinq minutes, 85 jours d'arrêt de travail en moyenne, soit près de 1,92 million de journées perdues pour le BTP (OPPBTP, 2012). Les chiffres pour 2011 sont en légère baisse, mais placent toutefois le secteur en première ligne. En effet, les chutes de hauteur constituent la principale cause d'accidents du travail graves et mortels. Enfin, bien que les statistiques de la Caisse nationale de l'assurance maladie des travailleurs salariés (CNAMTS) mettent en évidence une tendance générale à la baisse du nombre des accidents du travail au cours des vingt dernières années (1989-2010), la diminution concernant les chutes de hauteur est plus limitée (OPPBTP, 2012).

La stratégie de protection contre les chutes de hauteur consiste dans un premier temps à éliminer le risque à sa source : dans la mesure du possible, il faut éviter les travaux en hauteur. Sinon, il faut d'abord penser à mettre en place des protections collectives (garde-corps, filets). Enfin, en dernier recours, des équipements de protection individuels (ÉPI) sont fournis aux travailleurs (Branchtein, 2013; CSTC, 2015). Ces ÉPI sont particulièrement utilisés dans certaines professions (monteurs de lignes, monteurs de charpentes) où les systèmes de protection collectifs ne sont pas envisageables. Depuis la fin des années 90, les normes ont beaucoup évolué : il y a aujourd'hui 14 normes CSA-Z259 sur la protection contre les chutes de hauteur (Sabourin, 2011), et les réglementations internationales exigent de protéger tous les travailleurs exposés à un risque de chute de 1,8 m ou plus (CSTC, 2015; OSHA, 1998).

1.1.2 Protection contre les chutes à l'aide d'un SCAH

Les systèmes de protection individuels contre les chutes de hauteur comprennent plusieurs composants, notamment : un harnais, un cordon d'assujettissement (couramment appelé longe) avec ou sans absorbeur d'énergie, des accessoires de raccordement (mousquetons, manilles...) et des connecteurs d'ancrage. Afin de favoriser la liberté de mouvement des travailleurs, des

systèmes à cordes d'assurance horizontales (SCAH) peuvent être utilisés. Les SCAH sont un moyen peu coûteux et efficace de protéger les travailleurs contre les chutes de hauteur. En effet, sur le chantier du Complexe d'entraînement du Canadien de Montréal, huit travailleurs ont été sauvés par des CAH lorsqu'une partie de la structure s'est effondrée (Dupont, 2010). Par ailleurs, les SCAH permettent de limiter les actions du travailleur à seulement deux opérations (s'attacher et se détacher) afin d'assurer sa sécurité du début jusqu'à la fin de ses tâches. Bien que l'utilisation de filets de sécurité collectifs soit préférable, il y a des cas où celle-ci n'est pas envisageable. Par exemple, lors de la construction de l'usine de peinture Général Motors (dont la surface de la toiture est supérieure à 40 000 m²), environ 200 monteurs de charpentes métalliques étaient présents sur le chantier. La surface du bâtiment ne permettait pas l'utilisation de filets de sécurité, car ce chantier aurait à lui seul absorbé 75 % de la production nationale annuelle de filets de sécurité (Alaurent et coll., 1992). Ainsi, ce sont les SCAH qui ont été retenus comme moyen pour assurer la sécurité des travailleurs, et ils ont permis d'arrêter cinq chutes de hauteur (Dupont, 2010). Enfin, les SCAH sont moins onéreux que les filets de sécurité et présentent l'avantage d'être faciles à inspecter.

Les composants principaux d'un SCAH sont les ancrages (par exemple des colonnes structurales ou des potelets) et la corde d'assurance horizontale elle-même. Le travailleur porte un harnais, auquel est raccordé un cordon d'assujettissement qui lui permet de s'attacher à la corde d'assurance horizontale. Le cordon d'assujettissement (longe) doit obligatoirement être muni d'un absorbeur d'énergie depuis février 2001 (CSTC, 2001). L'absorbeur d'énergie a pour fonction principale de limiter à la fois les forces appliquées sur le travailleur lors de l'arrêt de chute et les efforts dans la corde d'assurance horizontale (CAH). L'évaluation des forces en jeu lors de l'arrêt d'une chute est primordiale pour le dimensionnement des potelets et de leur arrimage à la structure. Le calcul de ces forces est discuté à la section 1.2.

1.2 Conception des SCAH

Cette section présente les différents éléments entrant en jeu lors de la conception d'un SCAH, soit : les normes, les difficultés inhérentes à l'étude de câbles sous chargement dynamique et le recours à des méthodes analytiques simples.

1.2.1 Aspect normatif et réglementaire

Le texte ci-dessous est un extrait du Code de sécurité pour les travaux de construction (CSTC, 2015).

2.10.15. Système d'ancrage:

La liaison antichute d'un harnais de sécurité doit être fixée à:

1° un point d'ancrage ponctuel ayant l'une des caractéristiques suivantes:

- a) une résistance à la rupture d'au moins 18 kN;*
- b) conçu et installé selon un plan d'ingénieur conformément à la norme Conception de systèmes actifs de protection contre les chutes CSA Z259.16, et ayant l'une des caractéristiques suivantes:*

- i) *une résistance égale à 2 fois la force maximale d'arrêt tel qu'attesté par un ingénieur;*
 - ii) *certifié conforme à la norme Équipement de protection individuelle contre les chutes - Dispositifs d'ancrage EN 795 publiée par le Comité européen de normalisation ou à la norme Connecteurs d'ancrage CAN/CSA Z259.15;*
- 2° *un système d'ancrage continu flexible (corde d'assurance horizontale) ayant l'une des caractéristiques suivantes:*
- a) *conforme aux normes minimales suivantes:*
 - i) *un câble d'acier d'un diamètre minimum de 12 mm relâché selon un angle minimum de 1 vertical pour 12 horizontal, soit 5 ° par rapport à l'horizontale;*
 - ii) *une distance maximale de 12 m entre les ancrages d'extrémité;*
 - iii) *les ancrages d'extrémité doivent avoir une résistance à la rupture d'au moins 90 kN;*
 - iv) *utilisé par au plus 2 travailleurs à la fois;*
 - b) *conçu et installé selon un plan d'ingénieur, conformément aux normes Systèmes de corde d'assurance horizontale flexibles CSA Z259.13 et Conception de systèmes actifs de protection contre les chutes CSA Z259.16;*
- 3° *un système d'ancrage continu rigide conçu et installé selon un plan d'ingénieur conformément à la norme Conception de systèmes actifs de protection contre les chutes CSA Z259.16.*

Un système d'ancrage:

- 1° *doit être conçu de telle sorte que l'anneau en D du point de suspension du harnais de sécurité du travailleur ne pourra être décalé horizontalement de plus de 3 m ou d'un angle de 22 °;*
- 2° *ne peut être utilisé par plus d'une personne à la fois, sauf s'il s'agit d'un système d'ancrage continu, tel une corde d'assurance horizontale, ou rigide, tel un rail;*
- 3° *doit être conçu de manière à ce qu'un équipement de protection individuelle correctement attaché ne puisse pas être détaché involontairement.*

La structure sur laquelle est installé le système d'ancrage doit être capable de supporter l'effort apporté par le système d'ancrage en plus des autres efforts auxquels elle doit normalement résister.

Un système d'ancrage ayant les caractéristiques décrites aux sous-paragraphes b des paragraphes 1 ou 2 du premier alinéa, ou au paragraphe 3 de cet alinéa doit, avant sa première mise en service, être inspecté et mis à l'essai par un ingénieur ou une personne qualifiée agissant sous la supervision d'un ingénieur, pour en vérifier la conformité aux plans de conception et d'installation.

On remarque donc deux choses très importantes :

- 1) La liaison antichute doit limiter la force maximale d'arrêt de chute à 6 kN (ce qui n'était pas le cas avant 2001, cette obligation est apparue dans le CSTC en février 2001);
- 2) Un SCAH doit être conçu par un ingénieur ou répondre aux exigences minimales données dans l'alinéa 2°a.

Il faut noter que les exigences minimales données dans l'alinéa 2°a sont très conservatrices, en raison notamment de la limitation à 6 kN de la force maximale d'arrêt de chute (l'absorbeur d'énergie a pour effet de diminuer la force d'arrêt maximale (FAM) et donc les efforts de traction aux ancrages).

Enfin, le CSTC fait référence à la norme CAN/CSA-Z259.11 (CAN/CSA-Z259.11, 2005) sur les absorbeurs d'énergie ou à la norme CAN/CSA-Z259.2.2 sur les enrouleurs-dérouleurs (CAN/CSA-Z259.2.2, 2004). La norme Z259.11 définit deux classes d'absorbeurs : E4 et E6. La classe E4 limite la FAM à 4 kN en conditions normales (6 kN pour un absorbeur d'énergie en conditions de gel : absorbeur immergé dans de l'eau à 20 °C pendant au moins 8 h, drainage de l'excès d'eau pendant 15 minutes, absorbeur exposé à une température de -35 °C pendant 8 h). Ce type d'absorbeur d'énergie est recommandé pour les travailleurs dont la masse avec équipement est inférieure à 115 kg. La classe E6 limite la FAM à 6 kN en conditions normales (8 kN pour un absorbeur d'énergie en conditions de gel) et convient pour les travailleurs dont la masse avec équipement est comprise entre 90 et 175 kg.

1.2.2 Étude des câbles sous chargement dynamique

Lorsqu'un ingénieur conçoit un SCAH, la question de la méthode d'analyse du câble se pose. En effet, les structures de type câble sont relativement complexes à étudier du fait de leur comportement hautement non linéaire : leur géométrie change en fonction du chargement appliqué. Dans le cas d'un SCAH, le câble au repos aura une forme proche d'une parabole (on parle de courbe caténaire). Lors de l'arrêt d'une chute accidentelle, lorsque l'équilibre statique est rétabli, le câble aura une forme triangulaire. Outre cette non-linéarité géométrique, les câbles présentent souvent des non-linéarités élastiques : leur rigidité augmente avec le chargement (Broughton et Ndumbaro, 1994). De nombreux chercheurs ont proposé des solutions théoriques pour l'analyse de câbles caténaux sous chargement statique, mais celles-ci restent très complexes pour une utilisation quotidienne. D'autre part, le cas de la chute d'un travailleur relié à un SCAH relève d'une étude dynamique, et non statique, ce qui rend l'étude plus complexe encore. Enfin, pour la plus grande part des méthodes analytiques, les points d'ancrage des SCAH sont considérés comme fixes ou ayant une rigidité infinie. Cette hypothèse est réaliste dans le cas où l'ancrage est massif, par exemple un mur ou une colonne structurale, mais elle conduit à un surdimensionnement dans le cas où le SCAH est ancré à des potelets.

L'analyse pratique d'un SCAH demande donc de formuler des hypothèses simplificatrices afin de rendre sa conception plus aisée, tout en maintenant un niveau de sécurité satisfaisant et en limitant le surdimensionnement. En effet, s'il est techniquement possible de faire une analyse très rigoureuse à l'aide de logiciels de structure avancés, il ne faut pas oublier que la plupart des SCAH sont utilisés lors de la construction d'une structure et que de longues heures de calcul en bureau d'étude reviennent plus chères qu'un système légèrement surdimensionné.

1.2.3 Méthode analytique simple pour la conception

Une méthode de conception analytique simple est d'une grande utilité pour les ingénieurs comme le montrent les chiffres de diffusion du rapport T-18 sur la conception de câbles de secours horizontaux publié par l'IRSST en 1991 (Arteau et Lan, 1991) : 864 guides format

papier vendus (depuis 1991), et 490 téléchargements sur le site web de l'IRSST (depuis le 29 septembre 2009). Ces chiffres peuvent paraître relativement faibles en regard de la diffusion d'autres documents téléchargés sur le site de l'IRSST, mais le contenu très technique de ce guide ne le destine qu'à un public d'ingénieurs concevant des SCAH. Par ailleurs, plusieurs ingénieurs contactés ont déclaré utiliser le guide technique régulièrement pour concevoir des SCAH ou pour évaluer les SCAH en place.

La première simplification, commune à toutes les méthodes analytiques (ou utilisées en pratique), est de se baser sur un problème pseudo-statique : on considère que la force appliquée par la chute du travailleur sur le SCAH est statique et égale à la FAM prévue par l'absorbeur d'énergie (soit une valeur comprise entre 4 et 8 kN). Ainsi la FAM qui s'exerce lors de la chute d'un travailleur ne sera pas supérieure à 8 kN, ce qui est nettement inférieur aux valeurs considérées dans le guide technique proposé en 1991.

Les analyses et essais menés précédemment ont montré que la force maximale aux ancrages est obtenue lorsque le travailleur chute à mi-portée du câble (Dayawansa et coll., 1989; Sulowski et Miura, 1983). En conséquence, le système statique et symétrique présenté à la Figure 1 est étudié. Par ailleurs, pour le calcul de la flèche du câble sous son propre poids, la courbe caténaire est approximée par une parabole.

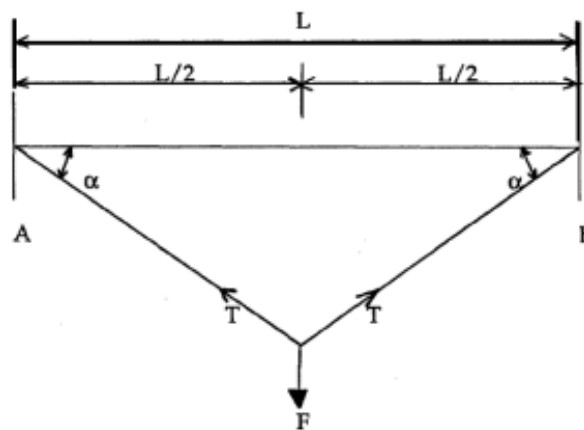


Figure 1 - Cas d'étude simplifiée (statique et symétrique).

La méthode proposée à la Figure 1 est celle qui a été utilisée dans le rapport T-18 *Guide Technique - Conception des câbles de secours horizontaux* (Arteau et Lan, 1991) et que nous proposons de mettre à jour dans le cadre de la présente étude. La mise à jour des abaques proposés dans le guide technique semble nécessaire puisqu'un absorbeur d'énergie est maintenant obligatoire (limitant la valeur de la force F à 8 kN; Figure 1) et que la méthode proposée en 1991 ne prenait pas en compte la flexibilité des ancrages (caractéristique des ancrages qui se rencontre sur certains chantiers).

1.3 Objectifs

L'objectif des travaux était de mettre à jour le guide technique T-18 rédigé en 1991, afin de faciliter la conception des cordes d'assurance horizontales, tout en répondant aux exigences normatives et réglementaires actuelles. Plus spécifiquement, les travaux de recherche présentés dans ce rapport visaient :

- 1) à proposer une méthode de calcul simple qui tient compte de la flexibilité des ancrages;
- 2) à effectuer en laboratoire une campagne d'essais dynamiques de chute et d'essais numériques pour valider la nouvelle méthode de calcul;
- 3) à développer de nouveaux abaques de calcul découlant de cette méthode.

Ce rapport s'adresse principalement à des ingénieurs responsables de la conception et de la vérification des SCAH.

1.4 Méthodologie

Les travaux de recherche comportent les étapes suivantes, présentées schématiquement à la Figure 2 :

- 1) réalisation d'un état de l'art sur les méthodes analytiques, les méthodes analytiques simples et les possibilités de modélisation des câbles caténaux à l'aide de logiciels de structure;
- 2) proposition d'une nouvelle méthode de calcul analytique tenant compte de la rigidité des ancrages;
- 3) reconstitution de SCAH au Laboratoire de structures de l'École Polytechnique et mesure des efforts aux ancrages des SCAH et du cordon d'assujettissement lors d'essais dynamiques de chute;
- 4) analyse dynamique de SCAH à l'aide d'un logiciel de structure, SAP2000;
- 5) comparaison et validation des résultats obtenus aux points 2, 3 et 4, programmation de la méthode analytique simple dans un tableur Excel et préparation de nouveaux abaques.

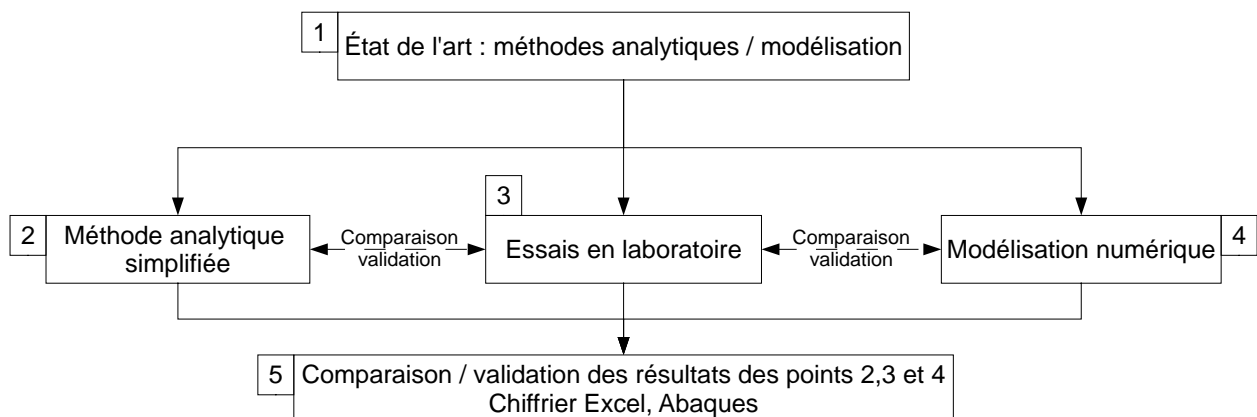


Figure 2 - Schématisation de la démarche.

1.5 Organisation du rapport

Le rapport comporte cinq chapitres. Le chapitre 2 présente une brève revue des méthodes analytiques référencées dans la littérature, la méthode analytique simple considérant la rigidité des ancrages et les abaques de dimensionnement des SCAH. Le chapitre 3 traite de la campagne d'essais dynamiques de chute, des résultats d'essais, de la comparaison des résultats d'essais à ceux obtenus avec la méthode analytique ainsi que d'une discussion. Le chapitre 4 comprend une brève revue des logiciels d'analyse disponibles et permettant de modéliser les SCAH : le logiciel sélectionné est SAP2000. Il présente également les caractéristiques du modèle numérique, les résultats obtenus avec SAP2000, leur comparaison avec la méthode analytique simple et une discussion. Enfin, le chapitre 5 présente les caractéristiques du tableau Excel qui a été développé dans le cadre de cette recherche et les sécurités qui sont intégrées. La méthodologie de recherche, les résultats et la discussion sont donc regroupés par chapitre.

2. MÉTHODE ANALYTIQUE SIMPLE

Cette section présente une méthode analytique simple permettant de déterminer la force aux ancrages : charge d'arrêt maximale (CAM).

2.1 Méthodes analytiques proposées dans la littérature

Cette section recense brièvement quelques méthodes analytiques de calcul des SCAH qui ont été recensées dans la littérature, et présente leurs avantages et désavantages (Tableau 1).

Tableau 1 - Méthodes analytiques de calcul pour les SCAH.

Référence	Avantage	Désavantage
CTICM (1977)	Méthode statique simple Abaques pratiques	Ne considère pas la rigidité des ancrages Abaques non adaptés à l'Amérique du Nord (diamètre des câbles) Tensions initiales considérées très élevées dans les abaques Pas de validation expérimentale
Sulowski et Miura (1983)	Courbe caténaire (plutôt qu'une parabole) Abaques (pas très faciles à utiliser) Validation expérimentale	Méthode énergétique plutôt complexe Pas d'absorbeur d'énergie Résolution avec programme spécifique seulement (HP BASIC) Code non fourni
Dayawansa et coll. (1989)	Code FORTRAN présenté dans le rapport Validation expérimentale de la méthode Quelques abaques en annexe Position de la charge pas forcément au centre	Résolution d'un système à six équations non linéaires : besoin d'un code spécifique (exemple en FORTRAN) Pas d'absorbeur d'énergie
Paureau et Jacqmin (1998)	Considère l'amortisseur dans la ligne de vie Calcule l'étirement de l'absorbeur d'énergie Possibilité de rajouter la flexibilité de l'ancrage	Méthode plutôt complexe (encore plus complexe avec l'ancrage flexible) Nécessité de coder pour pouvoir l'utiliser Précision plutôt faible dans certains cas du fait du grand nombre de paramètres et d'incertitudes Validation expérimentale avec six essais seulement Pas d'abaques
Branchtein (2013)	Méthode plutôt simple Flexibilité des ancrages Possibilité de programmer en Excel	Pas d'abaques Pas de validation expérimentale Basé sur une méthode énergétique qui considère des forces constantes (dans la réalité, dissipation d'énergie) Résolution par minimalisation : parfois plus d'une solution : il faut vérifier en prenant différentes hypothèses de base

Les différentes méthodes analytiques répertoriées dans le tableau présentent toutes certains avantages et désavantages. Le choix de l'une plutôt que l'autre dépendra des objectifs que se fixe l'utilisateur ou concepteur du SCAH. Sur les cinq méthodes analytiques recensées, trois nécessitent un code spécifique, ce qui semble peu approprié dans le cadre d'un dimensionnement rapide ou plus généralement pour une diffusion large de la méthode. Les deux autres méthodes peuvent être intégrées assez facilement à un tableur (Excel, par exemple), mais celle du Centre technique industriel de la construction métallique (CTICM) ne tient pas compte de la rigidité des ancrages, et celle de Branchtein est un peu plus complexe et ne s'appuie pas sur une validation expérimentale. La méthode proposée dans le guide technique de 1991 est très similaire à celle du CTICM, mais adaptée pour le cas nord-américain (diamètres de câbles différents) et avec une lecture d'abaques nettement plus simple que ceux proposés dans la note du CTICM.

Le recensement de quelques méthodes classiques de dimensionnement des câbles proposées dans la littérature, et des mesures expérimentales qui ont servi à le valider, a permis d'identifier des conclusions générales : le câble a un comportement principalement linéaire élastique, l'allongement du harnais est de l'ordre de quelques centimètres (ce qui n'a pas d'impact pratique sur le calcul du dégagement), la masse des composantes du SCAH peut être considérée comme étant négligeable (Paureau et Jacqmin, 1998). Sulowski et Miura (1983) recommandent que les études subséquentes portent sur des câbles de différents diamètres, et que les méthodes analytiques développées proposent une représentation graphique des résultats. Ces deux points sont traités dans le cadre de cette recherche.

2.2 Mise en équation

2.2.1 Hypothèses de calcul

Les hypothèses suivantes sont posées afin de formuler la méthode analytique :

- Toutes les composantes du SCAH sont considérées élastiques;
- Un seul travailleur (ou force augmentée pour simuler la chute de plusieurs travailleurs, voir les recommandations de la norme Z259.16);
- Chute à mi-portée (cas le plus défavorable; Dayawansa et coll. 1989, et Sulowski et Miura, 1983);
- Une seule travée;
- Chargement statique;
- Masses de l'ÉPI négligées par rapport à la masse du travailleur (100 kg);
- Géométrie du câble sous l'effet du poids propre : parabole (développement limité de l'équation caténaire).

Deux méthodes sont proposées dans la suite de cette section : celle de 1991 considérant les ancrages comme infiniment rigides, et une mise à jour permettant de prendre en compte la flexibilité des ancrages.

2.2.2 Ancrages infiniment rigides

L'équation permettant de calculer la flèche initiale à mi-portée f_1 ($x=L/2$) est donnée en (1). Les notations utilisées sont présentées sur le diagramme de corps libre (DCL) de la Figure 3.

$$f = \frac{wx^2}{2T_1} \quad (1)$$

$$f_1 = \frac{wL^2}{8T_1} \quad (2)$$

avec T_1 la tension initiale (en N), w le poids propre du câble (en N/m) et L la longueur de la travée (en m).

Les équations permettant de calculer la longueur demi-parabole (S_a ; en m) et l'élongation du câble (e_a ; en m) sous la charge F appliquée au centre (FAM, 4 kN pour un absorbeur de classe E4) sont :

$$S_a = \frac{L}{2} + \frac{w^2 L^3}{48T_1^2} \quad (3)$$

$$e_a = \frac{T}{EA} \quad (4)$$

avec E le module de Young du câble (en N/m²), A la section du câble (en m²) et T la tension dans le câble (en kN).

En utilisant le diagramme de corps libre de la Figure 3, on trouve :

$$F = 2T \sin \alpha \quad (5)$$

$$\cos \alpha = \frac{L}{2S_a(1+e_a)} \quad (6)$$

$$\cos \alpha = \frac{L}{2S_a \left(1 + \frac{T}{EA}\right)} \quad (7)$$

et on obtient finalement

$$T^2 = \frac{F^2}{4 \sin^2 \alpha} = \frac{F^2}{4(1 - \cos^2 \alpha)} \quad (8)$$

Connaissant L et f_1 ou T_1 , on peut résoudre et trouver T .

Puis on trouve la flèche max f_2 (en m) avec :

$$f_2 = \frac{wL^2 + 2FL}{8T} \quad (9)$$

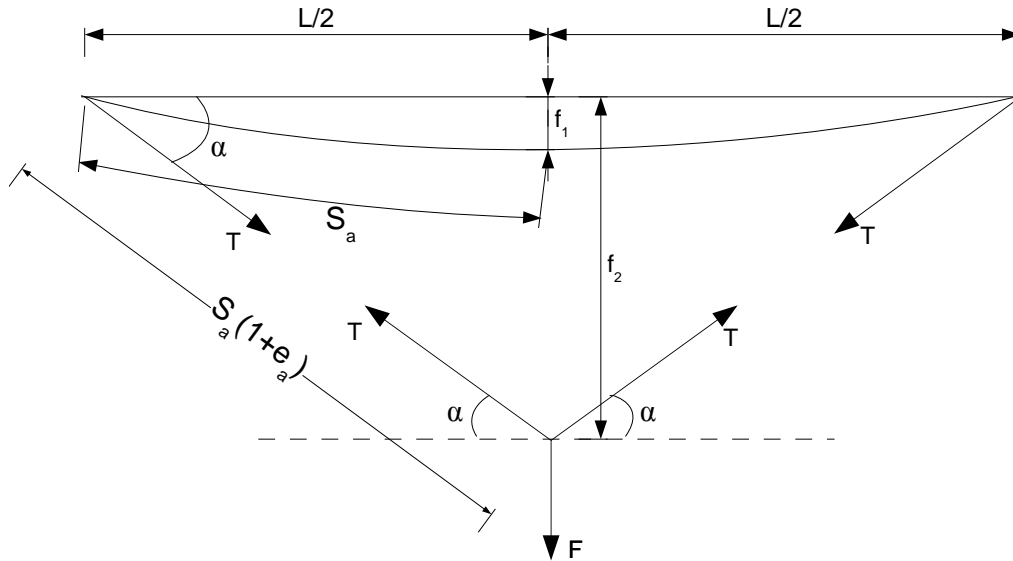


Figure 3 - Diagramme de corps libre considéré pour les équations.

Cette méthode, présentée en 1991, a favorisé le développement des abaques de calcul permettant d'estimer rapidement la CAM et donc de dimensionner les ancrages en conséquence. Par contre, le fait de considérer les ancrages comme infiniment rigides conduit à une conception un peu conservatrice et ne reflète pas nécessairement la réalité des chantiers.

2.2.3 Ancrages flexibles

Cette section présente une mise à jour de la méthode présentée précédemment afin de considérer la flexibilité des ancrages. Les notations sont présentées à la Figure 4.

En utilisant le diagramme de corps libre de la Figure 4, on obtient l'équation 10 ainsi que la nouvelle définition du $\cos \alpha$, tenant compte de la flexibilité de l'ancrage (éq. 12).

$$e_k = \frac{T}{K_A} \quad (10)$$

avec

$$K_A = \frac{3E_A I_A}{L_A^3} \quad (11)$$

$$\cos \alpha = \frac{L}{2 \left[S_a \left(1 + \frac{T}{EA} \right) + e_k \right]} \quad (12)$$

où e_k est le déplacement dû à la flexion de l'ancrage (en m) sous l'effet de la charge F , K_a est la rigidité de l'ancrage (en N/m), E_A est le module de Young pour le potelet et I_A le moment de flexion du potelet.

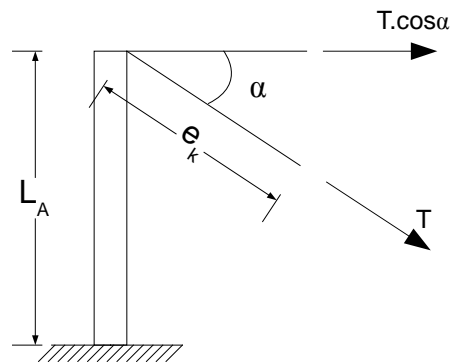


Figure 4 - Ancrage flexible.

En résolvant l'équation 13 suivante :

$$f(T) = T^2 - \frac{F^2}{4(1 - \cos^2 \alpha)} = 0 \quad (13)$$

avec la fonction *goalseek* d'Excel, il est possible de trouver la valeur de CAM (T). L'équation du quatrième ordre obtenue possède, dans la majorité des cas, une seule solution réelle et 3 solutions complexes avec des parties réelles négatives. L'utilisation de la fonction *goalseek* d'Excel ne donne que la solution réelle. L'utilisation du solveur d'Excel pourrait être préférable à l'utilisation de la fonction *goalseek* puisqu'il est paramétrable.

2.3 Influence des paramètres sur la réponse du SCAH

2.3.1 Effets de la portée, de la tension initiale et de la FAM

Le guide de conception des SCAH publié en 1991 a présenté les effets de la portée, de la tension initiale et de la FAM sur la CAM :

- En conservant F et T_I constants, plus la portée est grande, plus la force à l'ancre T diminue (mais la flèche initiale f_I est de plus en plus grande);
- Pour F et L constants, plus T_I est grand, plus la force à l'ancre T est grande, cette augmentation est relativement limitée (et la flèche initiale f_I est de plus en plus faible);
- Toutes choses étant égales par ailleurs, plus F est grand, plus T est grand.

2.3.2 Effet du diamètre du câble

L'écart de tension est calculé selon l'équation 14. L'utilisation d'un câble de 9,5 mm de diamètre au lieu de 12,7 mm de diamètre permet de diminuer la tension maximale à l'ancrage jusqu'à 13,2 % (Tableau 2). La diminution est plus marquée pour une tension initiale importante (flèche initiale faible).

$$EcartT = \frac{T(12,7 \text{ mm}) - T(9,5 \text{ mm})}{T(12,7 \text{ mm})} \quad (14)$$

Tableau 2 - Influence du diamètre du câble sur la CAM (écart T, en %), en fonction de f_1 et L.

L (m)	f_1 (m)								
	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
3	9,5	6,5	4,2	2,6	1,7	1,2	0,8	0,6	0,4
5	11,7	10,1	8,3	6,5	5,0	3,8	2,9	2,2	1,7
10	12,8	12,3	11,7	11,0	10,1	9,2	8,3	7,4	6,5
20	13,1	13,0	12,8	12,6	12,3	12,0	11,7	11,3	11,0
30	13,1	13,1	13,0	12,9	12,8	12,7	12,5	12,3	12,1
40	13,2	13,1	13,1	13,0	13,0	12,9	12,8	12,7	12,6

L'écart de flèche est calculé selon l'équation 15. L'utilisation d'un câble d'un diamètre de 12,7 mm plutôt que de 9,5 mm permet de diminuer la flèche maximale jusqu'à 12,5 % (Tableau 3). L'écart de flèche f_2 est plus important lorsque la tension initiale est grande (flèche initiale faible) ou lorsque la portée est importante (supérieure à 20 m).

$$Ecartf_2 = \frac{f_2(9,5 \text{ mm}) - f_2(12,7 \text{ mm})}{f_2(9,5 \text{ mm})} \quad (15)$$

Tableau 3 - Influence du diamètre du câble sur la flèche (écart f_2 , en %), en fonction de f_1 et L.

L (m)	f_1 (m)								
	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
3	9,4	6,4	4,1	2,5	1,6	1,1	0,7	0,5	0,3
5	11,6	9,9	8,1	6,4	4,8	3,6	2,7	2,1	1,6
10	12,5	12,0	11,4	10,6	9,8	8,9	8,0	7,1	6,2
20	12,5	12,4	12,2	12,0	11,7	11,4	11,1	10,7	10,3
30	12,3	12,2	12,1	12,0	11,9	11,8	11,6	11,4	11,2
40	12,0	12,0	11,9	11,9	11,8	11,7	11,6	11,5	11,4

Donc, à moins d'avoir une travée très longue, un câble de 9,5 mm de diamètre est tout à fait capable de supporter les charges engendrées par un arrêt de chute.

2.3.3 Effet de la rigidité des ancrages

La Figure 5 présente l'effet de la rigidité des ancrages sur la force maximale à l'ancrage T et sur la flèche maximale f_2 , pour un câble de 12,7 mm de diamètre ($E = 64,8 \text{ GPa}$ et $A = 64,18 \text{ mm}^2$).

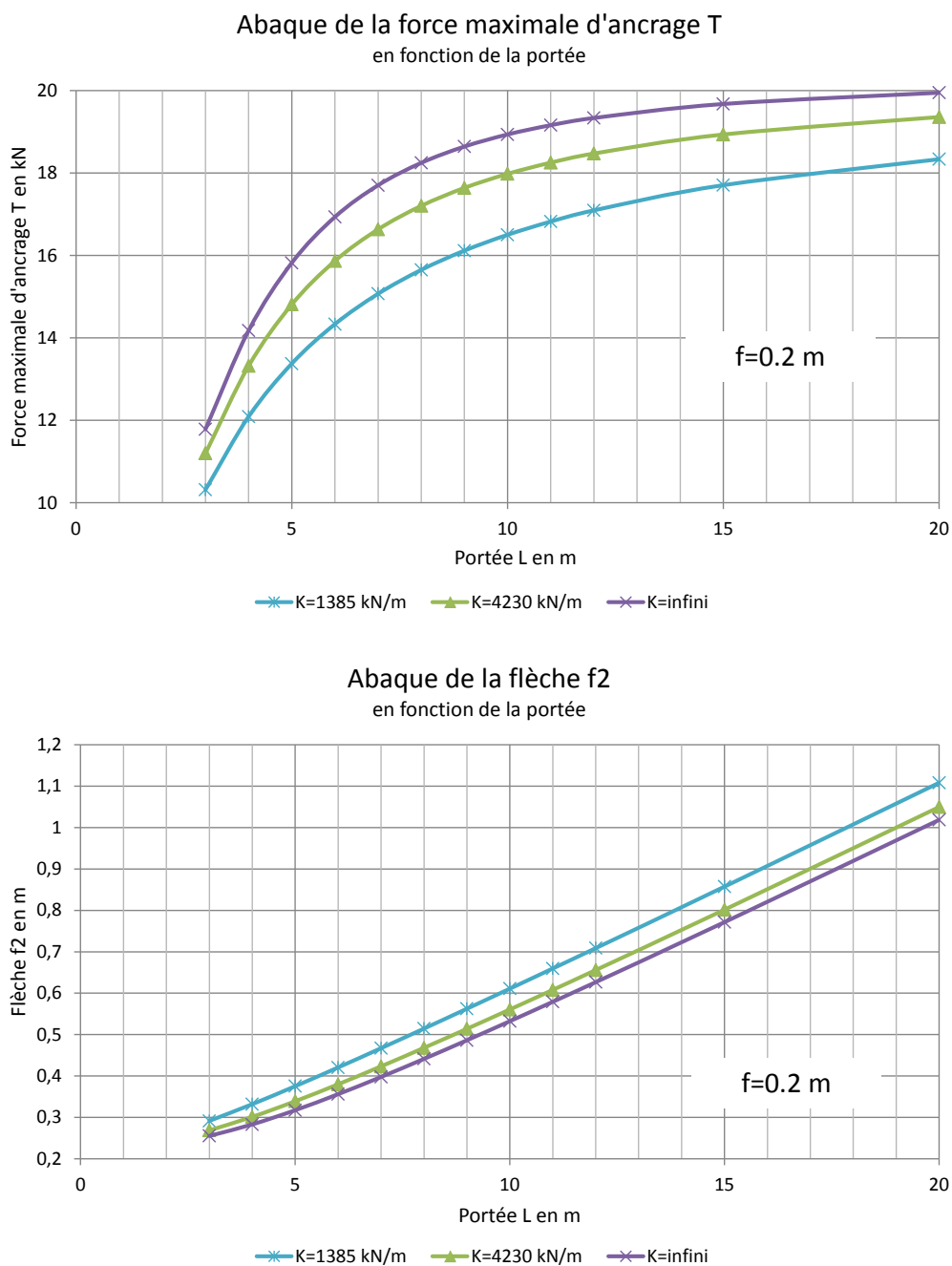


Figure 5 - Effet de la rigidité des ancrages.

On peut remarquer, comme on pouvait s'y attendre, que plus l'ancrage est rigide, plus la force maximale dans le câble va être élevée, et plus la flèche sera faible. L'augmentation de la flèche est cependant relativement limitée (de l'ordre de +10 cm pour une portée de 20 m) : il faudrait donc peut-être privilégier des ancrages flexibles correctement conçus pour limiter les forces dans le système.

Il est important de considérer la flexibilité des ancrages lors de la conception des SCAH, puisque les ancrages flexibles sont plutôt courants sur les chantiers (Arteau et Lan, 1991).

2.3.4 Travées multiples

Pour les câbles à travées multiples, une méthode simple a été proposée dans les années 1970 par le CTICM. En effet, lorsque la portée totale est importante, il faut soutenir le câble en plusieurs points afin qu'il reste à portée de main du travailleur, malgré la flèche qu'il prend sous son poids propre (CTICM, 1977). Ces appuis ne reprennent pas de force horizontale tant qu'ils permettent le glissement du câble (ce qui est conseillé). Par rapport à un câble de portée unique équivalente, la CAM T est plus faible pour un câble à travées multiples et la flèche f_2 plus grande.

Les formules suivantes sont données dans la note technique du CTICM (CTICM, 1975) :

$$C_r = \frac{0,47 \cdot n + 1,53}{n + 1} \quad (16)$$

avec

$$T_1 < 1000 \text{ kg (9,81 kN)}$$

où n est le nombre de travées (les portées des travées doivent être constantes). Le coefficient réducteur C_r sert à multiplier la CAM T calculée pour un câble à portée unique de longueur totale équivalente afin de trouver la CAM pour un câble à n portées.

Supposons qu'un câble de longueur L a une CAM estimée de 30 kN. Pour un câble à $n=3$ portées chacune de même longueur L , on a :

$$C_r = \frac{0,47 \cdot 3 + 1,53}{3 + 1} = \frac{2,94}{4} = 0,735 \quad (17)$$

Soit une CAM de : $0,735 \cdot 30 = 22,05$ kN.

Pour la flèche, il faut calculer un coefficient de majoration :

$$C_m = \frac{n + 1}{0,4 \cdot n + 1,6} \quad (18)$$

avec $T_1 > 200 \text{ kg (1,96 kN)}$

Ainsi, si un câble à une seule portée de longueur L a une flèche de 1,2 m, on a pour un câble à 4 travées de longueur L :

$$C_m = \frac{4+1}{0,4 \cdot 4+1,6} = \frac{5}{3,2} = 1,5625 \quad (19)$$

Soit une flèche de $1,5625 \cdot 1,2 = 1,875 \text{ m}$.

Cette tension minimale semble très élevée (cela correspond à une flèche initiale de 10 cm pour un câble de 20 m de portée et de 12,7 mm de diamètre). C'est surtout une tension minimale difficile à mettre en œuvre au chantier sans équipement particulier. Une vérification de l'applicabilité de ces coefficients de réduction et de majoration sera proposée avec SAP2000.

2.4 Abaques de calcul pour ancrages rigides

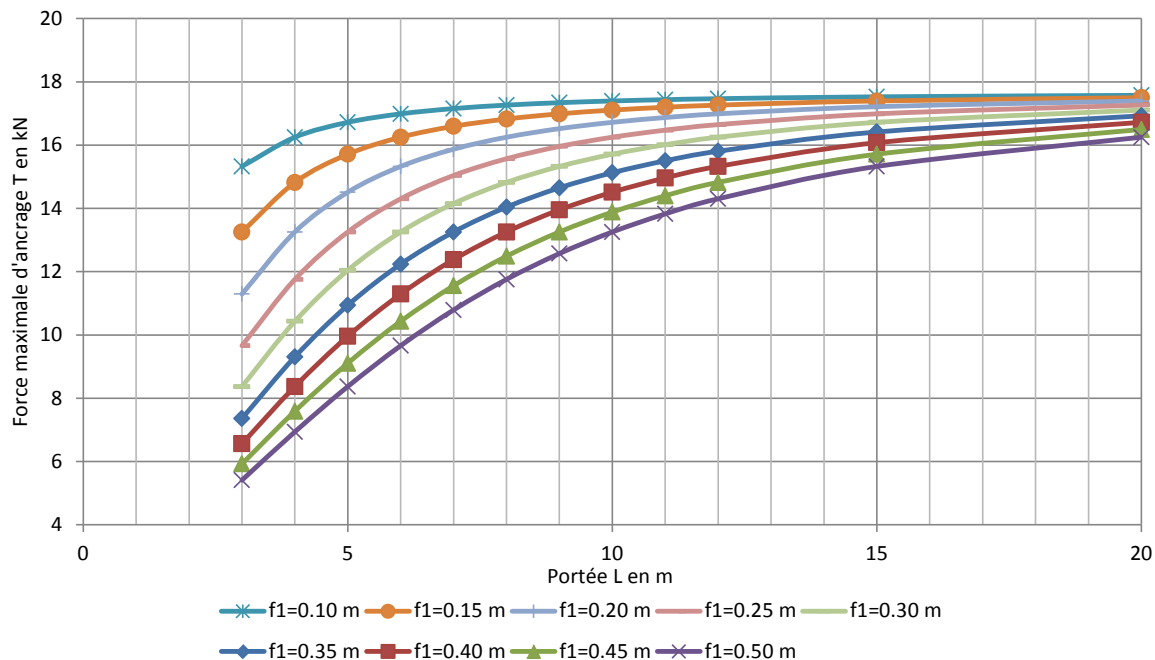
Les abaques proposés dans cette section sont valables pour un câble d'une travée unique, avec des ancrages rigides. Ils peuvent donc être utilisés pour la conception des ancrages flexibles puisque les forces calculées seront conservatrices. Par contre, les flèches seront sous-estimées pour un ancrage flexible, ainsi nous recommandons d'utiliser une hauteur de sécurité de 1 m pour le calcul du dégagement lorsque ces abaques sont utilisés. Deux types de câbles sont considérés : 9,5 mm et 12,7 mm de diamètre. Les caractéristiques de ces deux types de câbles sont données au Tableau 4.

Tableau 4 - Caractéristiques des câbles.

Diamètre du câble	E (GPa)	Construction	F Rupture (kN)	Diamètre du fil (mm)	Section acier (mm ²)
3/8 po (9,5 mm)	64,8	7x19	49	0,633	41,90
1/2 po (12,7 mm)	64,8	6x19	89	0,847	64,18

Pour les portées comprises entre 17 et 20 m, il est parfois difficile de différencier les courbes sur les abaques de calcul de la flèche présentés aux Figures 6 à 11. On peut cependant remarquer que l'écart sur la flèche lors de l'arrêt de chute entre une flèche initiale de 10 cm et une flèche initiale de 50 cm est de l'ordre de 10 cm. Cet écart est de l'ordre de grandeur des incertitudes sur la taille du travailleur et sur l'étirement du harnais lors de l'arrêt de chute. En cas de difficulté de lecture, on prendra donc la valeur la plus grande.

Abaque de la force maximale d'ancrage T
en fonction de la portée



Abaque de la flèche f2
en fonction de la portée

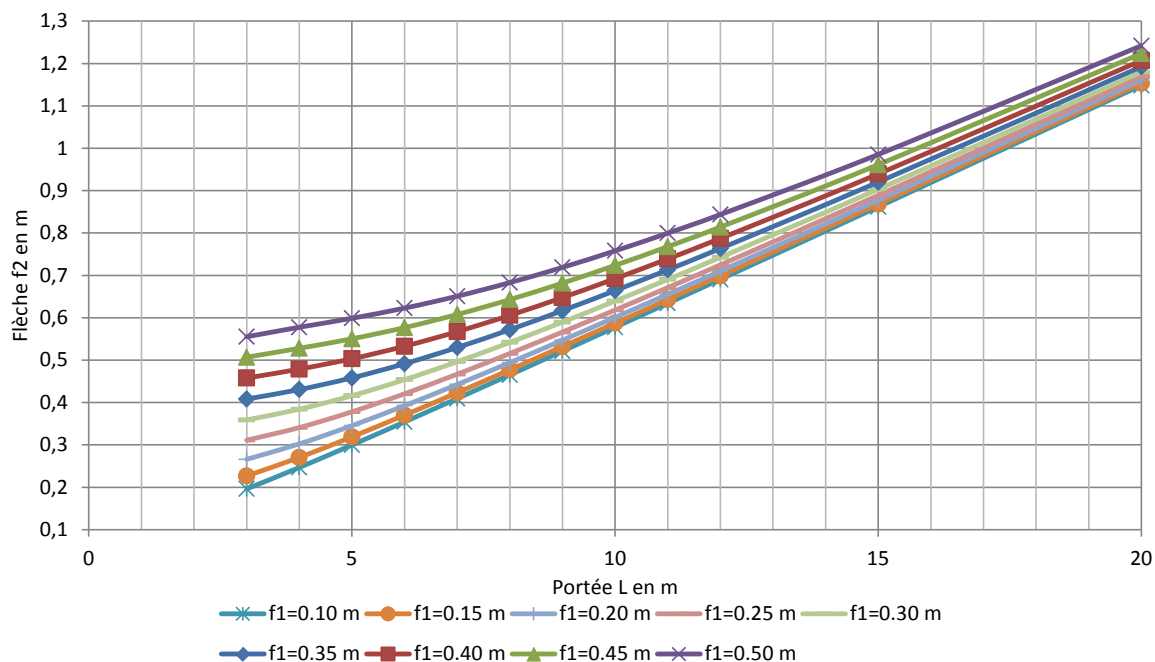


Figure 6 - Abaques de la CAM et de la flèche pour une FAM de 4 kN (câble de 9,5 mm de diamètre).

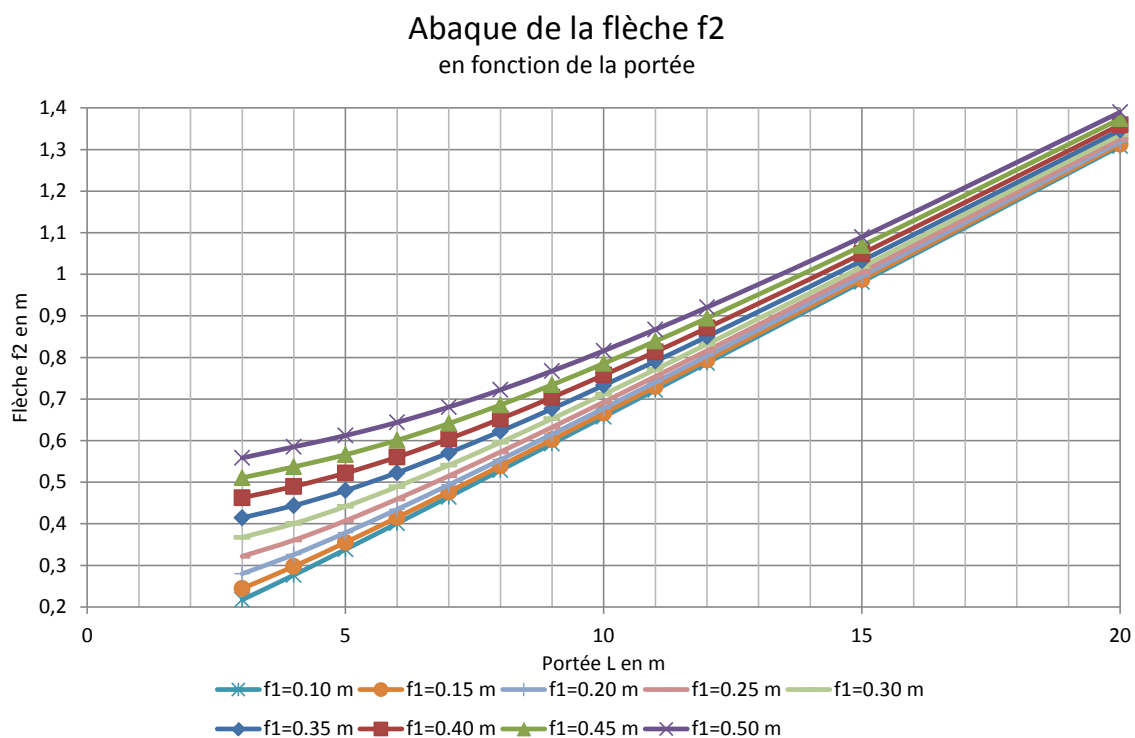
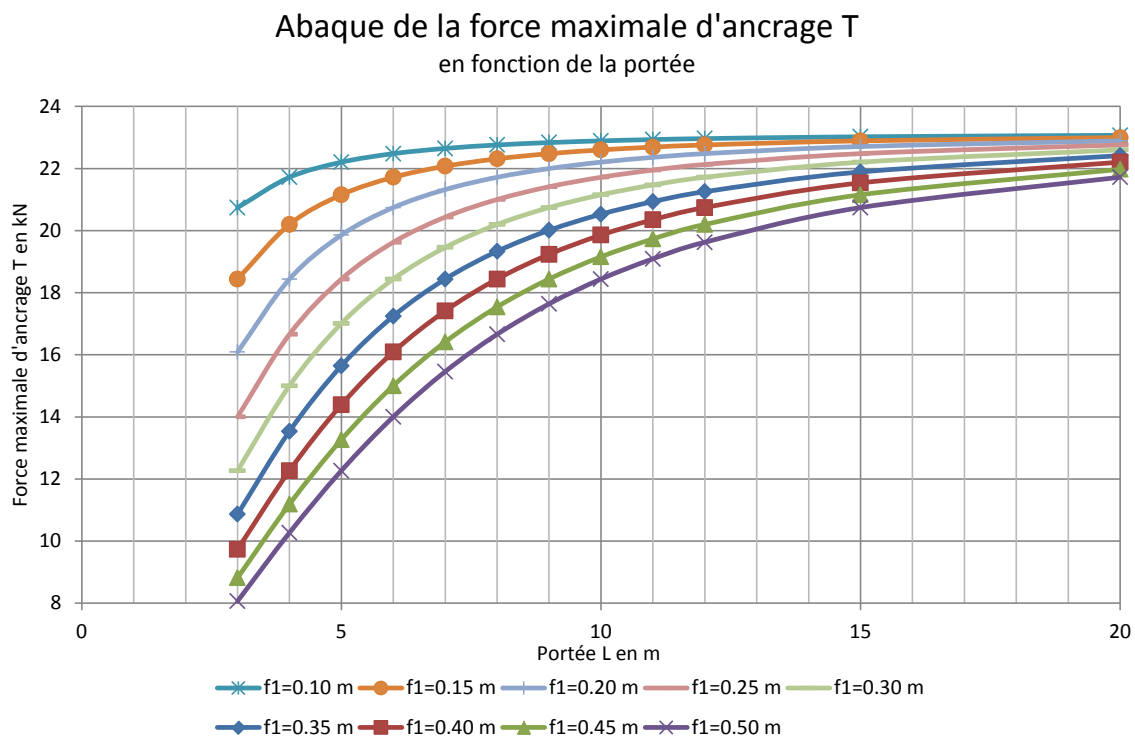


Figure 7 - Abaqués de la CAM et de la flèche pour une FAM de 6 kN (câble de 9,5 mm de diamètre).

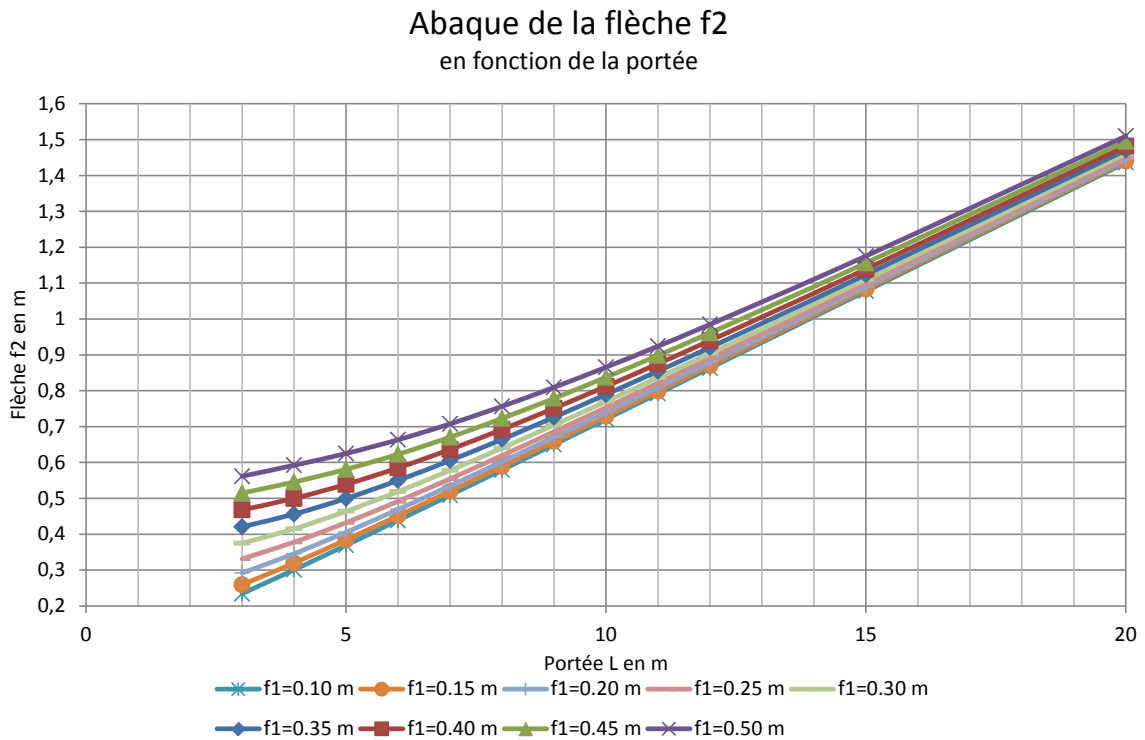
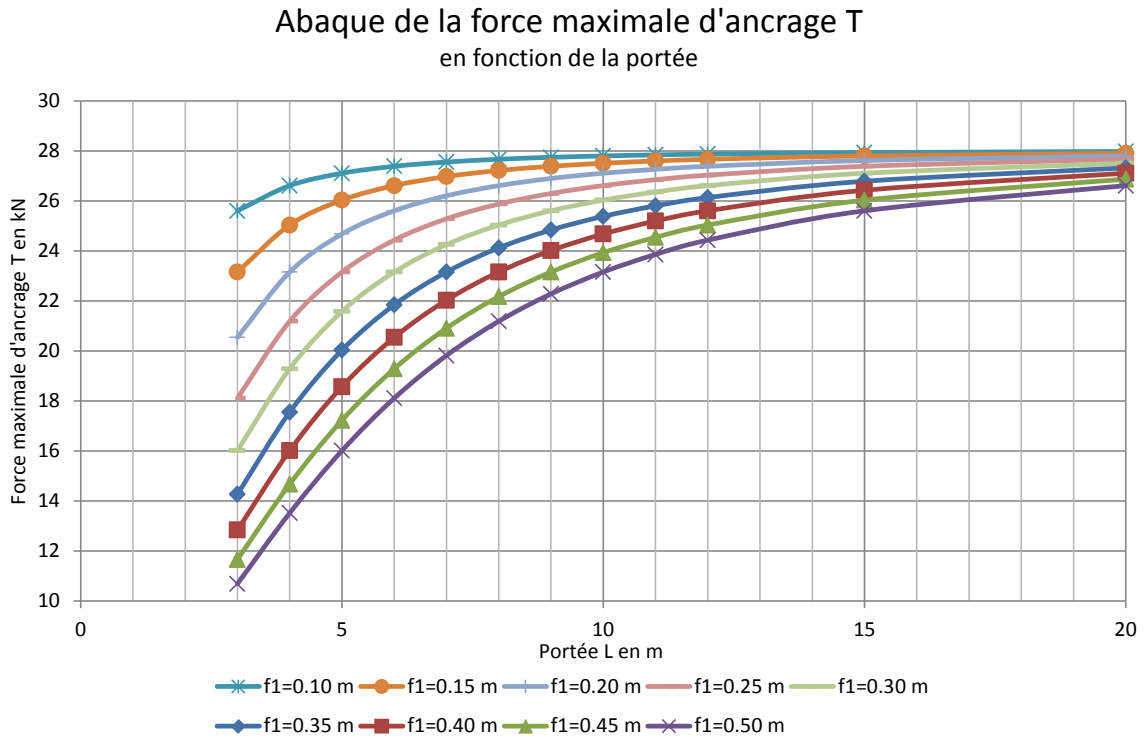


Figure 8 - Abaqués de la CAM et de la flèche pour une FAM de 8 kN (câble de 9,5 mm de diamètre).

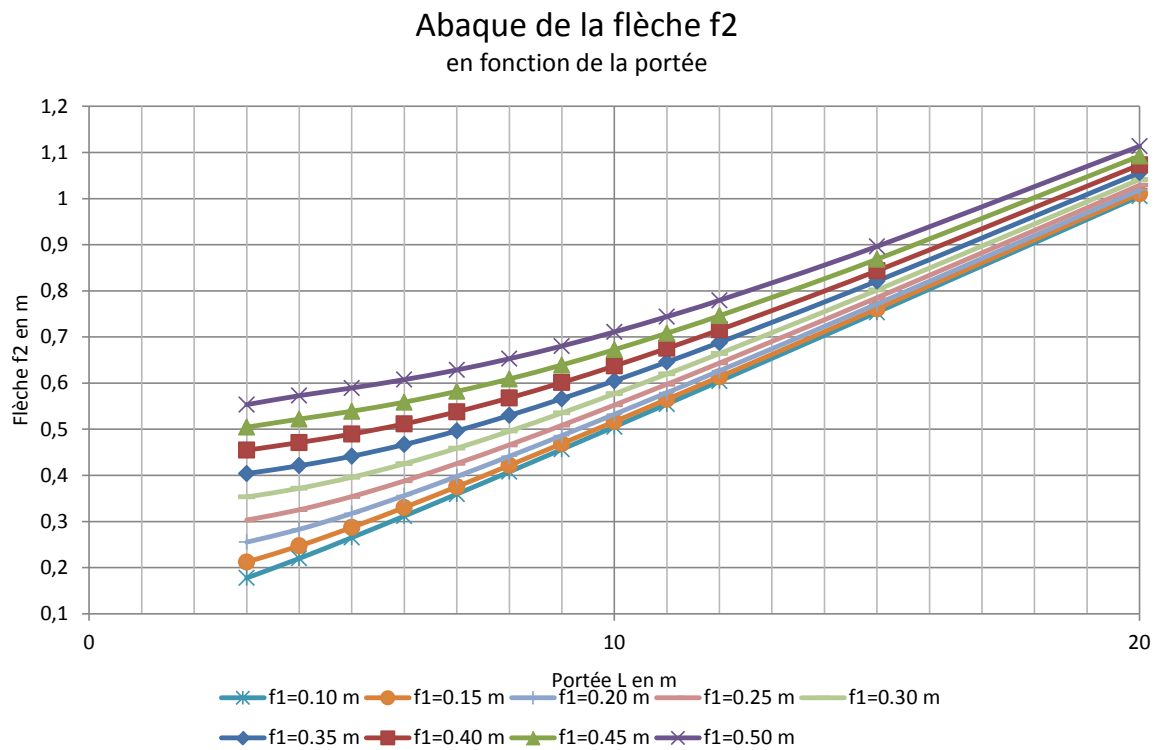
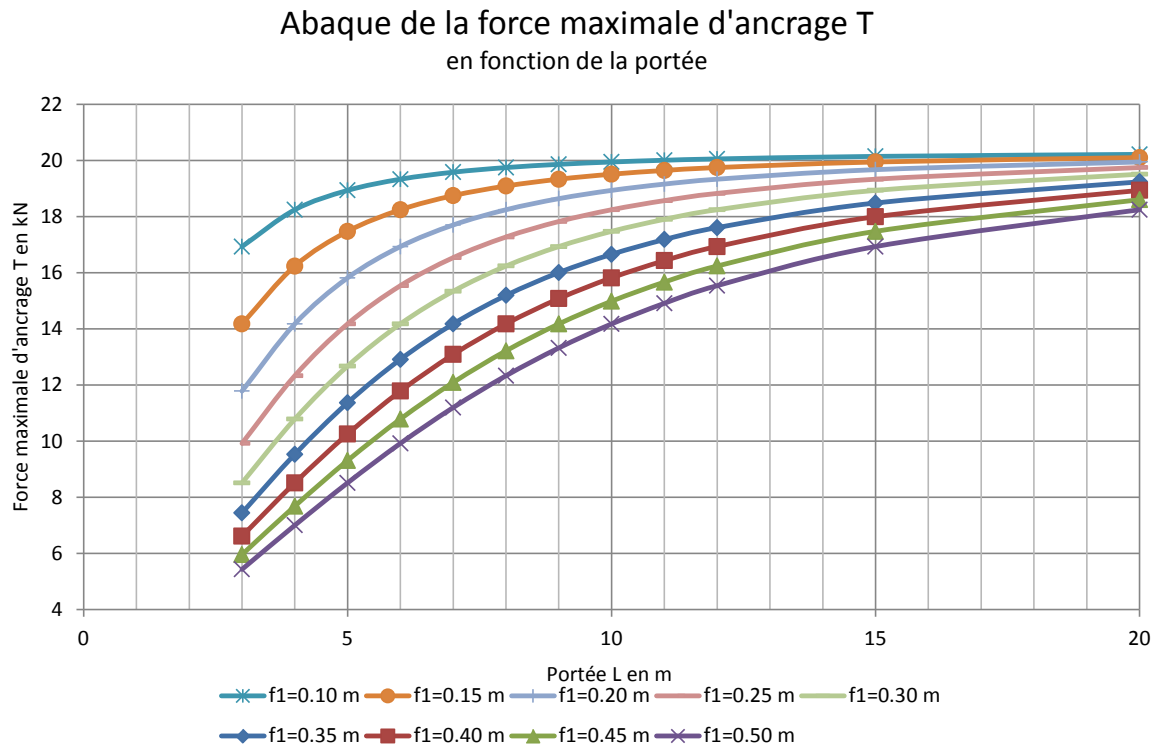


Figure 9 - Abaques de la CAM et de la flèche pour une FAM de 4 kN (câble de 12,7 mm de diamètre).

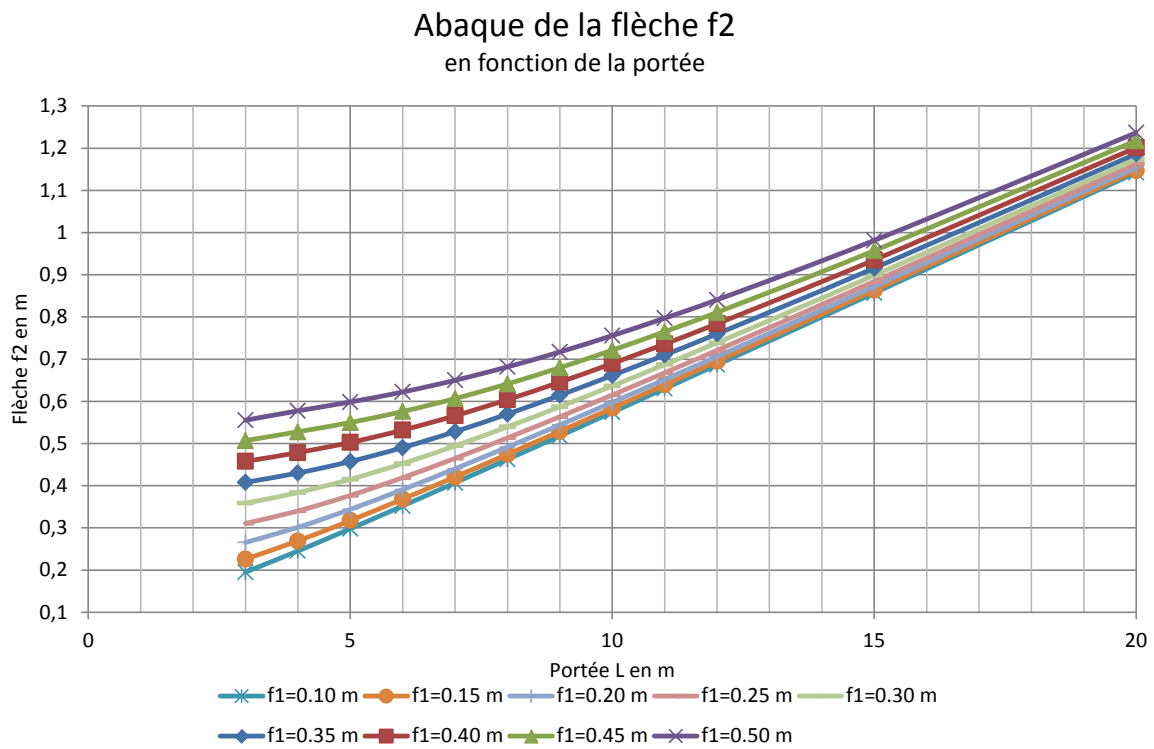
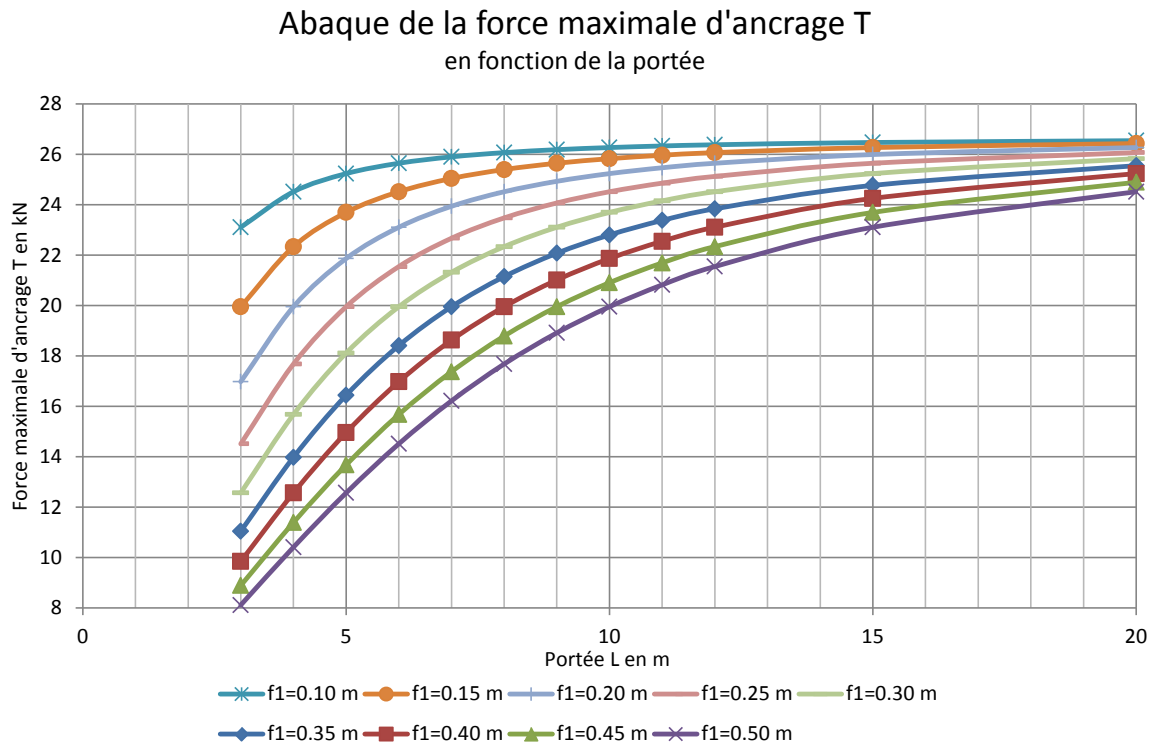


Figure 10 - Abaques de la CAM et de la flèche pour une FAM de 6 kN (câble de 12,7 mm de diamètre).

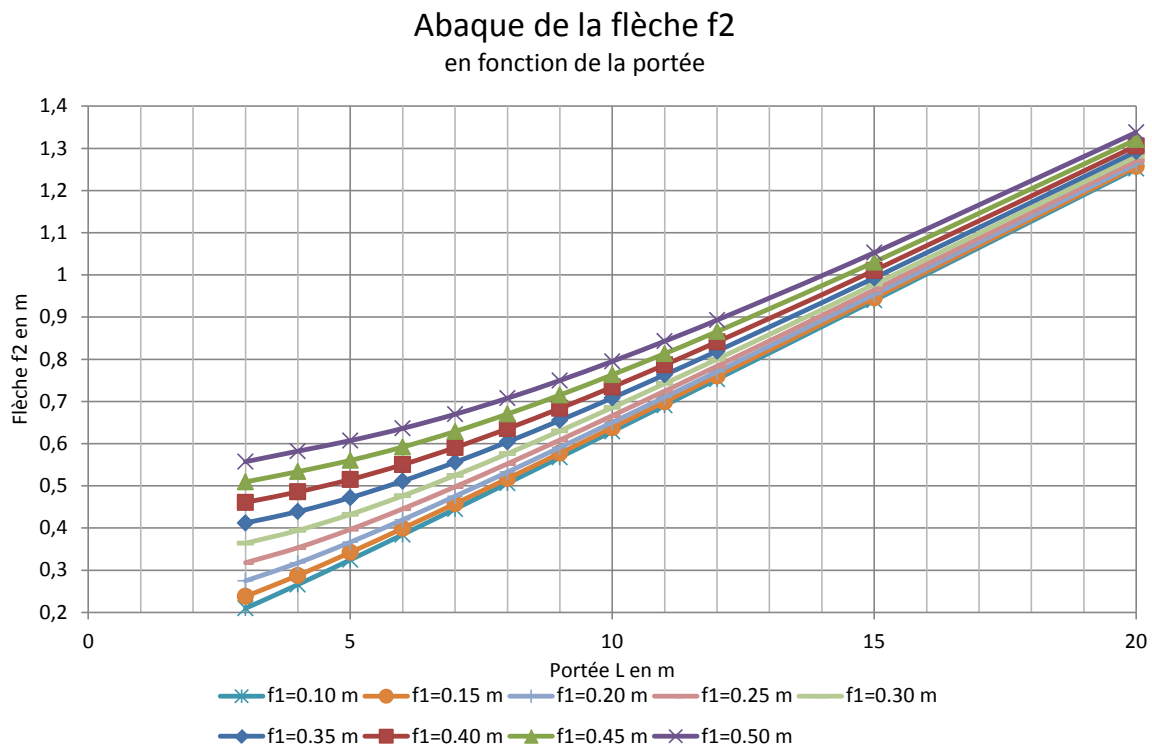
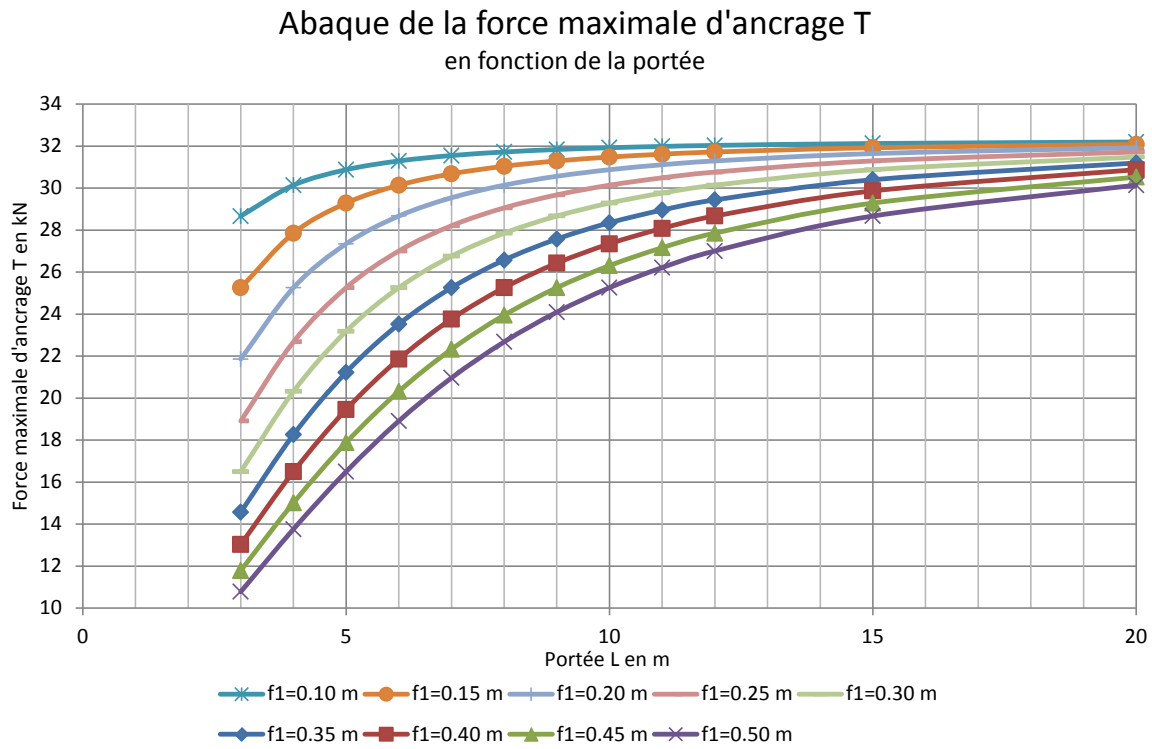


Figure 11 - Abaques de la CAM et de la flèche pour une FAM de 8 kN (câble de 12,7 mm de diamètre).

2.5 Calcul du dégagement

Le calcul du dégagement (D) nécessaire pour un travailleur retenu par un SCAH se fait de la façon suivante :

$$D = f_2 + L_l + d_a + h_t + d_s + e_h \quad (20)$$

où L_l est la longueur du cordon d'assujettissement (1,2 m ou 1,8 m), d_a est la longueur de déploiement de l'absorbeur d'énergie (max 1,2 m pour un absorbeur de classe E4, 1,8 m pour un absorbeur de classe E6), h_t est la hauteur de l'anneau en D par rapport aux pieds du travailleur (en m), d_s est la distance de sécurité (1 m pour un SCAH, comme défini dans la CAN/CSA Z259.13), et e_h l'étirement du harnais (environ 0,2 m).

Ce calcul est conservateur puisque le déploiement moyen de l'absorbeur d'énergie (d_a) peut se calculer avec l'équation suivante (principe de conservation d'énergie) :

$$d_a = \frac{Wh}{F_m - W} \quad (21)$$

avec h la hauteur de chute libre (en m), W le poids du travailleur en N (incluant son équipement), et F_m la force moyenne de déploiement de l'absorbeur (entre 2,5 et 2,8 kN pour un absorbeur de classe E4 comme observé lors des essais dynamiques de chute, ou $0,8 \times 4 = 3,2$ kN selon la Z259.16, environ 4,8 kN pour un absorbeur de classe E6).

Soit, dans notre cas de figure, pour une chute libre de 1,2 m et un travailleur de 100 kg :

$$d_a = \frac{100 \times 9,81 \times 1,2}{2600 - 100 \times 9,81} = 0,727 \text{ m} \quad (22)$$

en considérant une force de déchirement de 2,6 kN, comme observée lors des essais de laboratoire. Si une force de 3,2 kN était considérée, le déploiement de l'absorbeur serait de 0,52 m.

3. CAMPAGNE D'ESSAIS DYNAMIQUES DE CHUTE

L'objectif des essais expérimentaux menés au Laboratoire de structures de l'École Polytechnique est de simuler la chute d'un travailleur dans les conditions les plus proches possible de la réalité, tant pour la hauteur de chute que pour les composantes du SCAH. Ce programme expérimental s'appuie en partie sur l'expérience acquise durant les essais réalisés dans le cadre d'une recherche en cours, financée par l'IRSST et intitulée « *Évaluation d'un système de corde d'assurance horizontale et ancrages utilisés lors de la pose de toitures résidentielles* »², et sur l'expérience de l'équipe technique et scientifique du Laboratoire de structures de l'École Polytechnique.

3.1 Protocole expérimental

Le dispositif d'essais utilisé est présenté à la Figure 12.

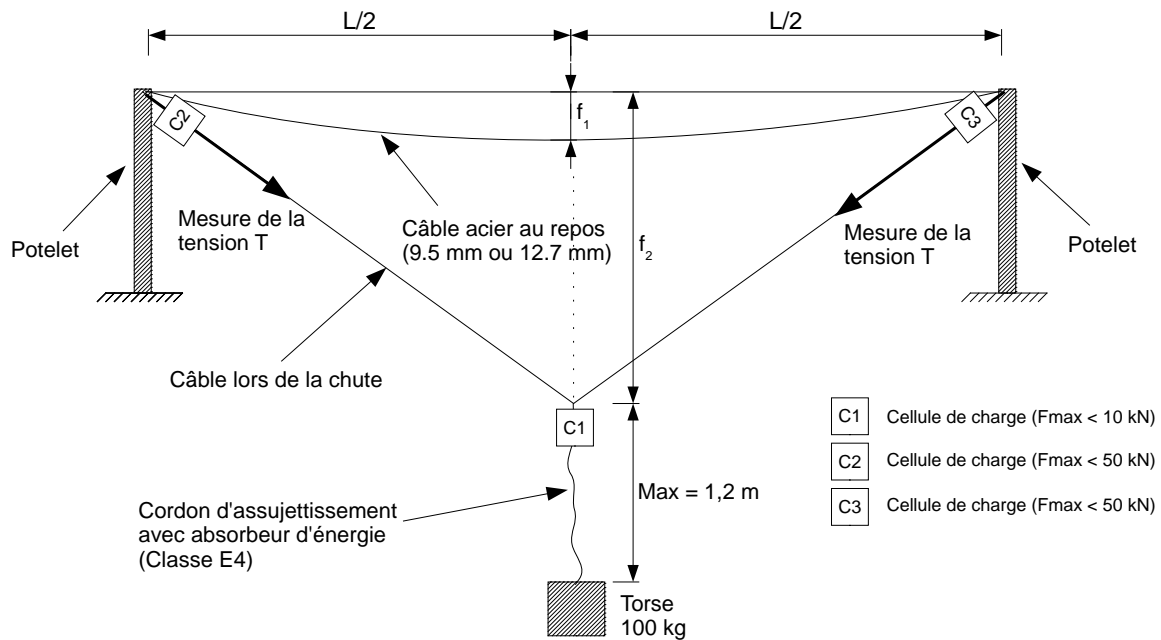


Figure 12 - Schéma de principe pour les essais.

Le câble d'acier constituant la CAH est d'un diamètre de 9,5 mm (3/8 po) ou 12,7 mm (1/2 po), soit ce que l'on retrouve couramment en chantier. Les potelets sont des HSS (*Hollow Structural Section*) en acier, rigidement assemblés avec un encastrement de hauteur variable pour faire varier la rigidité du point d'ancrage du câble (Tableau 7). Le cordon d'assujettissement (longe) est muni d'un absorbeur d'énergie conforme à la norme CAN/CSA-Z259.11 (CAN/CSA-Z259.12, 2011) de classe E4. Un torse en bois de 100 kg, muni d'un harnais conforme à la norme CAN/CSA-Z259.10 (CAN/CSA-Z259.10, 2012) est attaché au bout du cordon d'assujettissement, et une hauteur de chute libre de 1,2 m est utilisée pour réaliser les essais,

² <http://www.irsst.qc.ca/recherche-sst/projets/projet/i/5248/n/evaluation-d-un-systeme-de-corde-d-assurance-horizontale-et-ancrages-utilises-lors-de-la-pose-de-toitures-residentielles-2013-0047>

comme prescrit par la norme CAN/CSA-Z259.13 (CAN/CSA-Z259.13, 2009). Tous les accessoires de raccordement utilisés pour les essais sont conformes à la norme CAN/CSA-Z259.12 (CAN/CSA-Z259.12, 2011). Conformément à la norme CAN/CSA-Z259.13 (CAN/CSA-Z259.13, 2009), le matériel d'essai n'est utilisé qu'une fois par chute pour s'assurer de sa performance et de la reproductibilité des essais. Par ailleurs, la marge de sécurité pour la hauteur sera d'au minimum 1 m, soit celle exigée par la norme CAN/CSA-Z259.13 (CAN/CSA-Z259.13, 2009). L'ensemble des essais menés sur les SCAH est fait selon les exigences de la norme CAN/CSA-Z259.13 (CAN/CSA-Z259.13, 2009).

3.1.1 Matrice des essais

La nomenclature ci-dessous est utilisée pour identifier les essais dynamiques de chute.

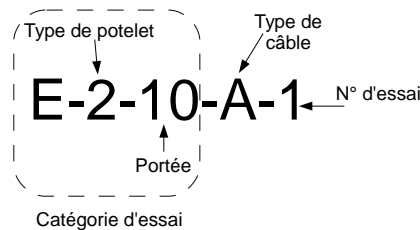


Figure 13 - Nomenclature utilisée pour désigner les essais dynamiques de chute.

Les Tableaux 5 et 6 présentent la matrice des essais et les caractéristiques de certains équipements.

Tableau 5 - Matrice des essais.

	Ancrage	Portée L		
		5 m ($f_1=0,1$ m)	10 m ($f_1=0,2$ m)	15 m ($f_1=0,3$ m)
Général	Potelet 1 (4"x4" ; 1 m)		E-1-10 (4) (câbles A et B)	
	Potelet 2 (5"x5" ; 1 m)	E-2-5 (6) (câbles A et B)	E-2-10 (6) (câbles A et B)	
	Potelet 3 (5"x5" ; 0,8 m)		E-3-10 (4) (câbles A et B)	
	Potelet 4 (4"x4" ; 1,5 m)		E-4-10 (2) (câble B)	
	Potelet 5 (5"x5" ; 1,5 m)		E-5-10 (2) (câble B)	E-5-15 (6) (câbles A et B)
Spécial	Potelet 2 (5"x5" ; 1 m)	T1E-2-5 (6) (câbles A et B) ($f_1=0,5$ m)		
	Rigide		E-R-10 (3) (câble A)	
			ME-R-10 (3) (câble B) (Longe nylon + masse 100 kg)	

Au total, 10 catégories d'essais (Tableau 5), comportant chacune de 2 à 6 essais, sont prévues pour un total de 42 essais de chute. Les types de câble (A et B) utilisés pour les essais sont présentés au Tableau 5.

Tableau 6 - Caractéristiques des câbles.

Câble A	Câble B
Câble d'aéronef 7 x 19 en acier inoxydable de type 304 de 9,5 mm (3/8 po) de diamètre	Câble d'aéronef 6 x 19 en acier inoxydable de type 316 de 12,7 mm (1/2 po) de diamètre

3.1.2 Choix des potelets, vérification de la résistance

Le Tableau 7 indique les types de potelets utilisés pour les essais dynamiques de chute : des potelets en acier avec des hauteurs différentes ou avec des sections différentes (pour faire varier la rigidité). La rigidité K_p pour un potelet encastré, de hauteur h_{pot} , avec une force ponctuelle appliquée au sommet, est obtenue grâce à l'équation ci-dessous :

$$K_p = \frac{3EI}{h_{pot}^3} \quad (23)$$

avec E le module de Young du matériau (200 GPa pour l'acier), et I l'inertie en flexion de la section.

Tableau 7 - Caractéristiques des potelets.

Section du potelet	Moment résistant pondéré M_r (kN.m)	Inertie en flexion I (mm ⁴)	Hauteur du potelet h_{pot} (m)	Rigidité du potelet K_p (kN/m)	Identification
HSS 102x102x8,0	30,4	3,98.10 ⁶	1,5	708	Potelet 4
			1,0	2388	Potelet 1
HSS 127x127x6,4	41,6	7,05.10 ⁶	1,5	1253	Potelet 5
			1,0	4230	Potelet 2
			0,8	8262	Potelet 3

En termes de rigidité, les potelets sont classés dans l'ordre suivant : 4 < 5 < 1 < 2 < 3.

L'inéquation ci-dessous sert à la vérification du potelet en flexion et en compression :

$$\frac{P_f}{C_r} + \frac{M_f}{M_r} \leq 1 \quad (24)$$

avec P_f l'effort axial pondéré sur le HSS, C_r l'effort normal pondéré résistant, M_f le moment fléchissant maximal pondéré et M_r le moment fléchissant résistant pondéré.

Selon le *Handbook of Steel Construction (HSC)*, le C_r (effort normal pondéré résistant en compression) est au minimum égal à 400 kN pour les sections et longueurs considérées. Avec une charge verticale de 4 kN (cas d'une FAM de 4 kN pour un travailleur chutant à proximité de l'ancrage), on obtient $P_f/C_r = 0,01$, ce qui est négligeable en regard du rapport M_f/M_r . On dit que c'est « la flexion qui gouverne ».

Pour la vérification de la section en cisaillement, on doit s'assurer que l'inégalité suivante est respectée :

$$f_{yy} \leq \varphi F_s \quad (25)$$

avec

$$f_{yy} = \frac{V_{fy}}{A_t} \quad (26)$$

où V_{fy} est l'effort de cisaillement pondéré, A_t est la section résistante au cisaillement, $F_s = 0,66 \cdot F_y$ ($F_y = 350$ MPa pour de l'acier de charpente) et $\varphi = 0,9$ est le facteur de sécurité.

En supposant une CAM de 30 kN, pour le plus petit potelet carré proposé dans le tableur (HSS 102x102x6,4), on a :

$$f_{yy} = \frac{V_{fy}}{A_t} = \frac{30 \times 1,5 \times 1000}{2 \times 102 \times 6,4} = 34,47 \text{ MPa} \leq 0,9 \times 0,66 \times 350 = 208 \text{ MPa} \quad (27)$$

En toute rigueur, il faudrait vérifier le potelet en cisaillement pour chaque montage expérimental, mais, dans les cas qui nous concernent, cette vérification n'est pas nécessaire en regard des faibles efforts de cisaillement et de la très grande résistance au cisaillement des sections des potelets considérées.

La vérification de la résistance en flexion des potelets est faite selon l'équation 28.

$$M_{f \max} = T \times h_{pot} \times 1,5 \leq M_r \quad (28)$$

où $M_{f \max}$ est le moment maximum généré à la base du potelet de hauteur h_{pot} et 1,5 est le coefficient de pondération pour une charge d'arrêt de chute agissant seule, selon la norme de *Conception de systèmes actifs de protection contre les chutes* (CAN/CSA-Z259.16, 2009).

La vérification de la résistance en flexion des potelets est présentée au Tableau 8. La CAM a été calculée avec la méthode présentée au chapitre 2, en considérant une FAM de 4 kN soit la valeur maximale prescrite par la norme CAN/CSA-Z259.11 (2005a). Pour la série d'essais E-4-10, le ratio $M_f/M_r < 1$ est vérifié pour une FAM de 3,2 kN, qui est une valeur à laquelle on peut raisonnablement s'attendre lors des essais.

Tableau 8 - Vérification de la résistance en flexion des potelets.

Essai	CAM T (kN)	$M_{f\max}$ (kN.m)	M_r (kN.m)
E-2-5	17,2	25,6	41,6
T1E-2-5	8,4	12,3	41,6
E-1-10 (1m)	17,4	25,9	30,4
E-2-10	18,0	26,8	41,6
E-3-10	18,4	22,0	41,6
E-2-15	18,3	27,2	41,6
E-4-10*	15,1 (12,9)	33,6 (28,8)	30,4
E-5-10	16,3	36,4	41,6
E-5-15	17,0	38,0	41,6

* valeur entre parenthèses = efforts attendus pour une FAM de 3,2 kN

3.2 Montage pour les essais dynamiques de chute

Le montage expérimental pour les essais de chute dynamiques est présenté à la Figure 14. La Figure 15 montre, de face et du dessus, le schéma du montage expérimental, ainsi que l'emplacement des jauges de déformation. Les portées réalisées au laboratoire font exactement 5,14 m, 10,14 m et 15,14 m. Avec le boulon à œil qui dépasse du potelet d'environ 3 po, soit 76 mm (voir section 3.2.4), on a donc des portées effectives de 5, 10 et 15 m, respectivement, pour le câble (à quelques centimètres près).

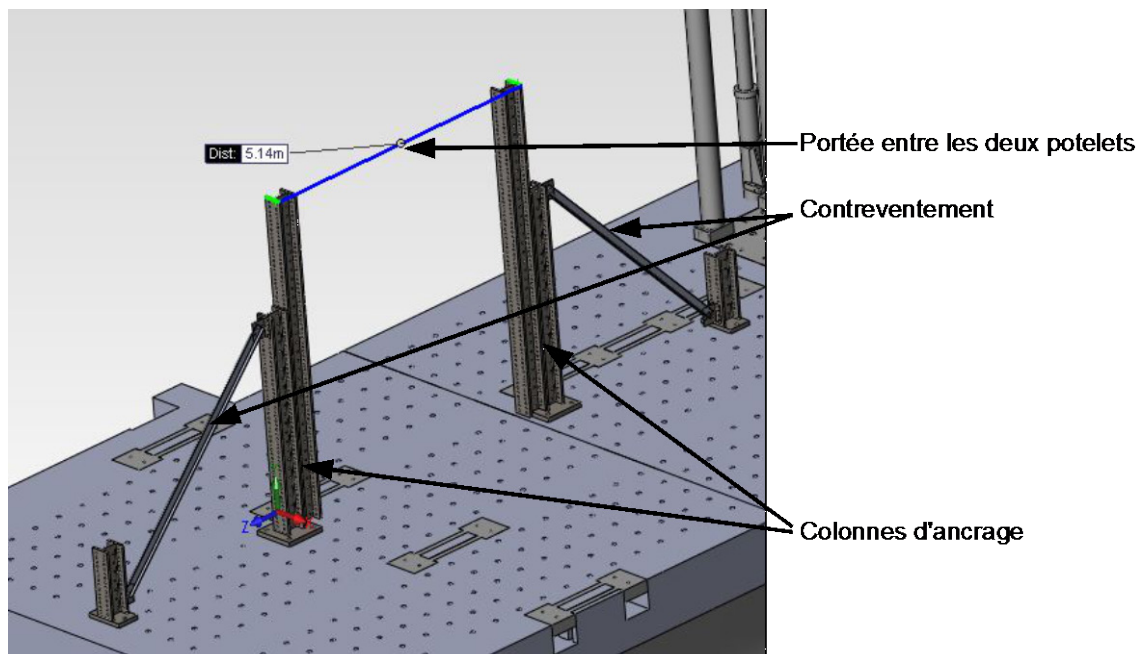


Figure 14 - Montage expérimental en laboratoire
(adaptée de Leclerc et Tremblay, 2015).

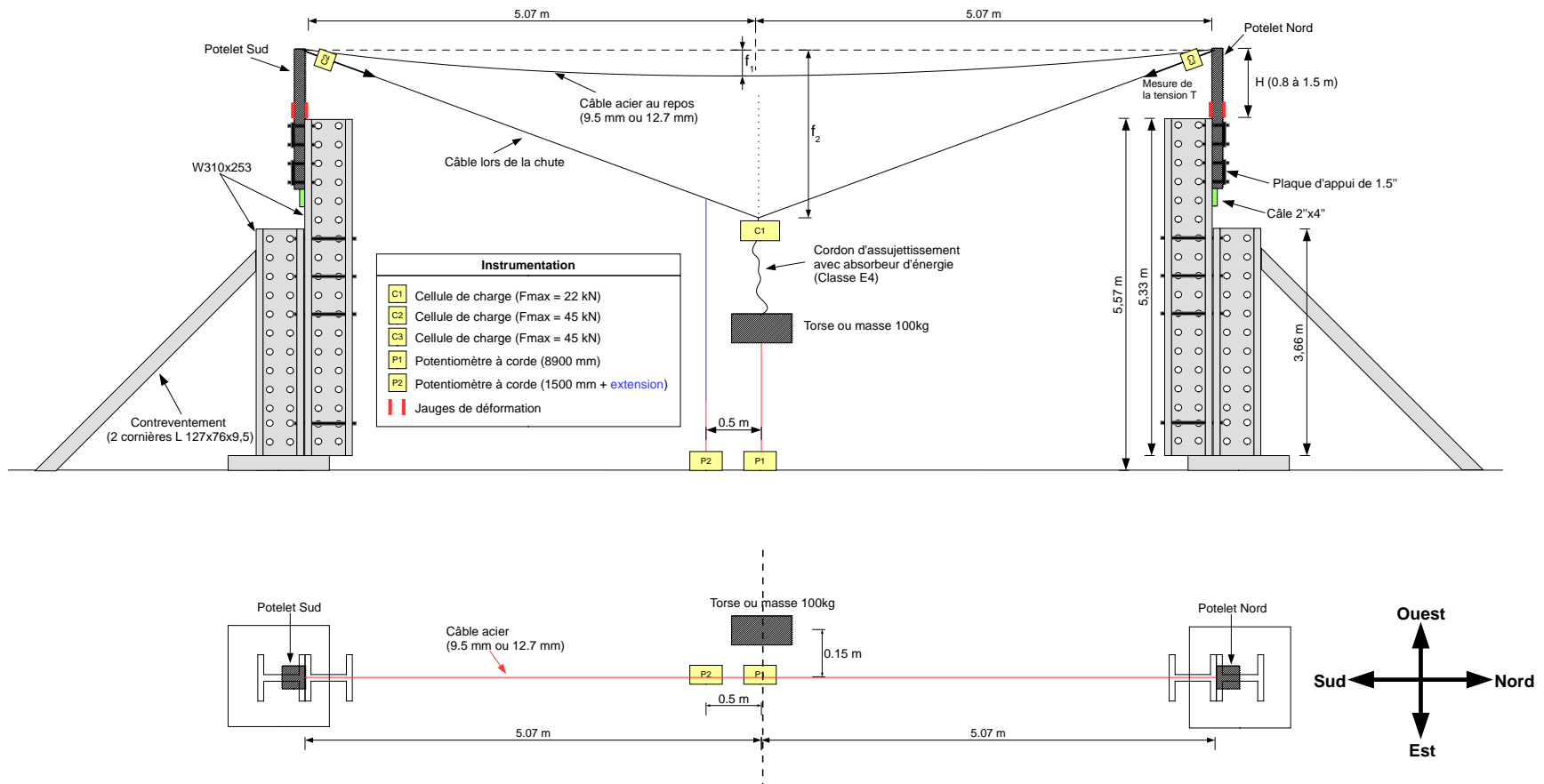


Figure 15 - Schéma du montage expérimental, vue de face (haut) et vue du dessus (bas) (échelle non respectée).

3.2.1 Estimation du dégagement nécessaire

Les dégagements nécessaires pour chaque catégorie d'essais sont présentés au Tableau 9 et calculés selon la méthode présentée à la sous-section 2.5 (éq. 20), avec un cordon d'assujettissement de 1,2 m et un torse de bois de 1 m.

$$D = f_2 + 1,2 + 1,2 + 1 + 0,2 + 1 = f_2 + 4,6 \quad (29)$$

Tableau 9 - Dégagements nécessaires pour les essais dynamiques de chute.

Essai	Câble 3/8 po (9,5 mm)		Câble 1/2 po (12,7 mm)	
	Flèche f_2 (m)	Dégagement (m)	Flèche f_2 (m)	Dégagement (m)
E-2-5	0,3	4,9	0,3	4,9
T1E-2-5	0,6	5,2	0,6	5,2
E-1-10	0,6	5,2	0,5	5,1
E-2-10	0,6	5,2	0,5	5,1
E-3-10	0,5	5,1	0,5	5,1
E-2-15	0,8	5,4	0,7	5,3

Le dégagement maximal nécessaire est donc de 5,4 m.

3.2.2 Colonnes d'ancrage

Les colonnes structurales sont contreventées afin que leur flexibilité ne vienne pas perturber les résultats d'essais (Figure 16). Ancrées au plancher du laboratoire, ces colonnes sont des profilés W310x253 de 3,66 m (12') de hauteur, auxquels deux extensions d'une longueur de 5,33 m (17,5') du même profilé sont boulonnées, totalisant ainsi une hauteur de 5,57 m. Le dégagement maximal nécessaire calculé au Tableau 9 est donc largement respecté puisque les potelets dépassent de 0,8 à 1,5 m la limite de hauteur des colonnes d'ancrage.

La rigidité a été mesurée *in situ* à l'aide d'une cellule de charge de 45 kN, d'un palan à chaîne de deux tonnes et d'un potentiomètre à corde de 500 mm. La régression linéaire utilisée pour déterminer la rigidité d'une colonne est présentée à la Figure 17. La valeur mesurée ($K_{ca} = 17,8$ MN/m) est plus faible que celle exigée par la norme CSA Z259.13 (20 MN/m). Le rapport théorique des rigidités entre la colonne d'ancrage et le potelet le plus rigide est de l'ordre de 2,15 ($K_{ca}/K_p = 17,8/8,26$) pour le rapport minimal, et de 25,1 ($K_{ca}/K_{p4} = 17,8/0,71$) pour le rapport maximal. Seulement quatre essais ont été faits avec le potelet le plus rigide. Pour les autres essais, le rapport de rigidité est de l'ordre de 5 ou plus. La rigidité combinée du potelet et de la colonne d'ancrage est plus faible que la rigidité du potelet seul, ce qui induira de petites différences dans la comparaison entre le modèle théorique et les mesures expérimentales (le modèle théorique devrait être conservateur).

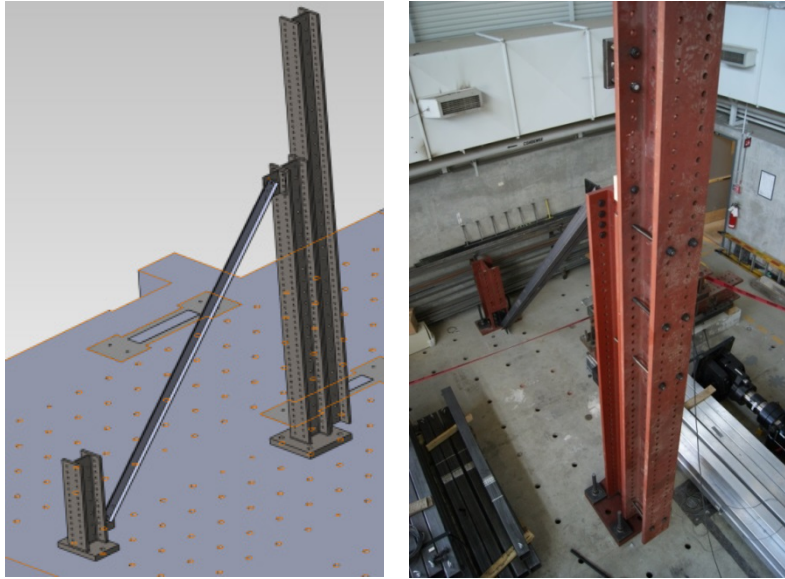


Figure 16 - Colonne d'ancrage pour les potelets
(Tirée de Leclerc et Tremblay, 2015).

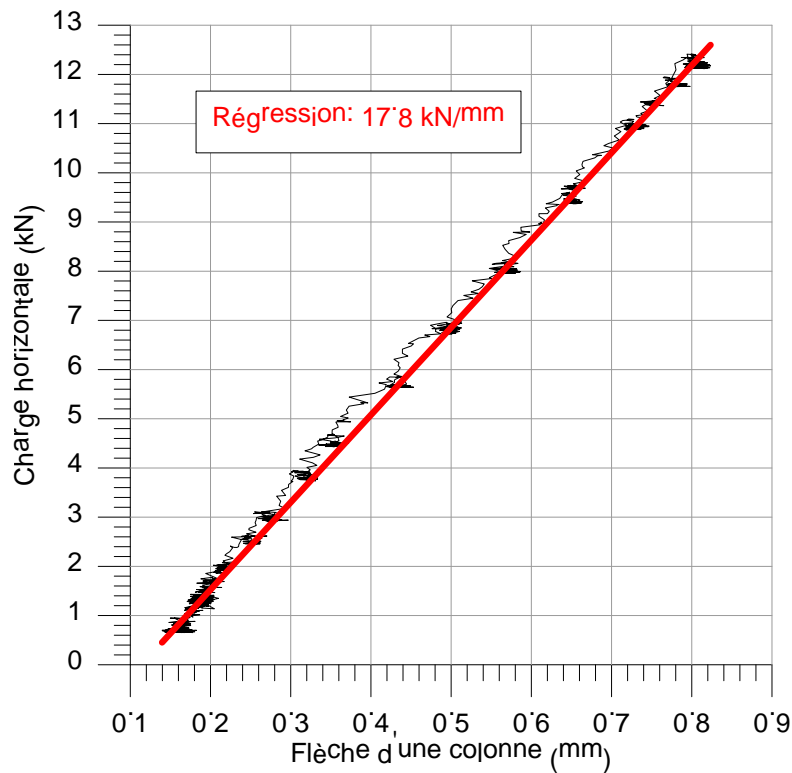


Figure 17 - Mesures pour déterminer la rigidité de chacune des colonnes d'ancrage
(Tirée de Leclerc et Tremblay, 2015).

3.2.3 Fixation des potelets

Le système de fixation des potelets est illustré à la Figure 18. Le système de fixation choisi pour les essais n'est pas celui qui est couramment employé sur les chantiers. Sur les chantiers, on

utilise plutôt une plaque qui sera boulonnée sur une poutre maîtresse et sur laquelle le potelet HSS est soudé. Néanmoins, pour des raisons de coûts et de praticité, le système présenté à la Figure 18 a été choisi. En effet, ce système de fixation représente fidèlement un encastrement et il permet d'ajuster très facilement la hauteur du potelet (et donc du point d'ancrage du câble). La première plaque d'appui (Figure 19) a été installée sur la cime de la colonne d'ancrage et la seconde environ au deux tiers de la « longueur d'ancrage » déterminée à la Figure 18. Les plaques sont maintenues par le biais de quatre tiges d'ancrages ASTM A193 (B7) de 25,4 mm (1") de diamètre, comme illustré à la Figure 18. Le serrage a été fait à la main. De manière à assurer la bonne longueur en porte-à-faux des potelets, une butée de bois a été installée à la base de l'encastrement (Figure 18).

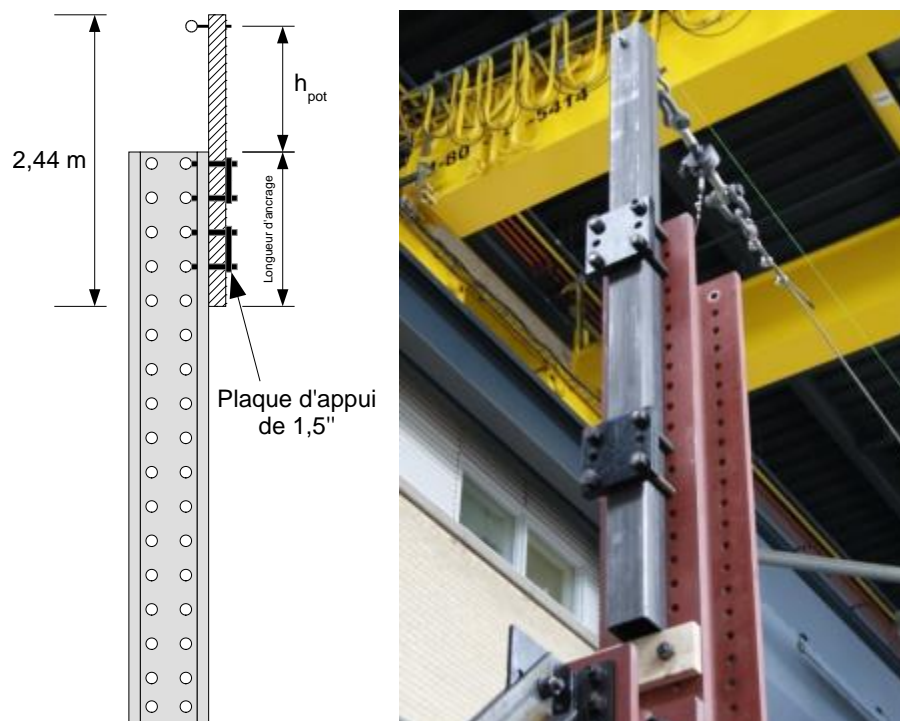


Figure 18 - Système de fixation des potelets pour les essais.

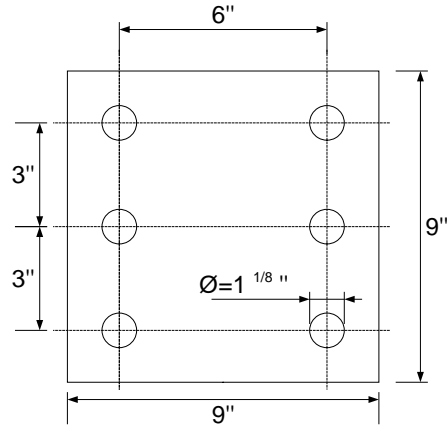


Figure 19 - Plaque d'appui.

3.2.4 Fixation du câble aux potelets

Le câble est fixé aux potelets avec un boulon à œil qui le traverse de part en part. Les dimensions indiquées sur le boulon à œil de la Figure 20 sont données au Tableau 10. Le boulon est installé à environ 7,6 cm (3 po) de l'extrémité du potelet. Ce type de boulon est peu onéreux, et le système de fixation est extrêmement simple (deux trous de 0,75 po de diamètre, boulon à œil traversant et boulonné). Ceci en fait un système de fixation couramment rencontré sur les chantiers.

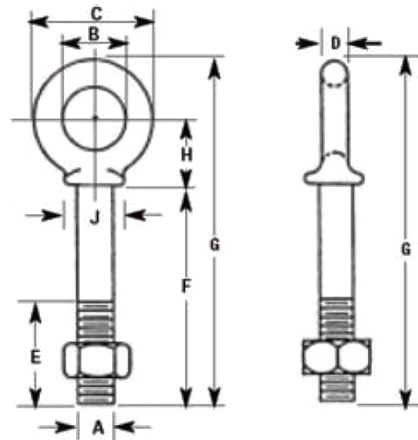


Figure 20 - Boulon à œil utilisé pour fixer le câble aux potelets.

Tableau 10 - Dimensions du boulon à œil.

Dimensions (po)										CMU (lb)
Taille	A	B	C	D	E	F	G	H	J	
3/4 x 6	0,75	1,5	2,75	0,62	3,0	6,0	8,94	1,56	1,38	7200

CMU = Charge maximale d'utilisation

Charge ultime = 5xCMU

Charge d'essai maximale = 2xCMU

La charge maximale d'utilisation (CMU) indiquée par le fabricant est de 7200 lb soit environ 32 kN, ce qui est largement suffisant pour les essais envisagés. En effet, la charge ultime est de 160 kN pour ces boulons, pour un maximum de 15-20 kN attendu lors des essais dynamiques de chute.

La flèche f_I indiquée au Tableau 5 représente la flèche initiale à mi-portée qui est ajustée en appliquant une tension initiale au câble à l'aide d'un tendeur de câble de 5/8" x 12" (Figure 21), ayant une CMU de 3500 lb (15,6 kN). L'ajustement de la flèche initiale f_I est fait de manière itérative; le câble n'étant pas changé à chaque essai, il y a de légères différences dans la tension initiale pour une flèche initiale identique. Comme on peut le voir à la Figure 21, l'œillet du câble est fabriqué en utilisant trois serre-câbles en acier de type 316, installés selon les recommandations du guide de gréement de l'Infrastructure Health and Safety Association of Ontario (IHSA, 2009).

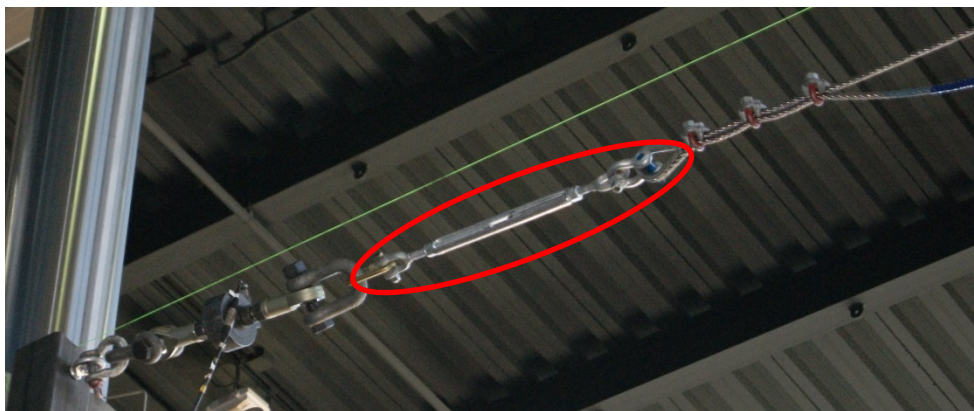


Figure 21 - Tendeur de câble 5/8" x 12" utilisé pour appliquer la flèche initiale
(Tirée de Leclerc et Tremblay, 2015).

3.3 Essais dynamiques de chute

3.3.1 Matériel

Le matériel utilisé pour la réalisation des essais de chute est détaillé ci-dessous :

- Torse de bois de 100 kg, conforme à la norme CSA Z259.10;
- Harnais de sécurité de catégorie A Delta de DBI Sala, Delta II (fabrication juillet 2014), conforme à la norme CSA Z259.10;
- Cordons d'assujettissement de 4 pi avec absorbeur d'énergie de classe E4, EZ Stop II DBI Sala, conforme à la norme CSA Z259.11;
- Mousquetons DBI Saflok de 3/4 po, conformes à la norme Z259.12. Mousqueton en acier avec clavette à verrouillage/fermeture automatique d'une résistance de 1633 kg (16 kN).

Les mousquetons sont utilisés comme connecteurs à différents endroits : connexion du tendeur à la cellule de charge (remplacement du mousqueton à chaque essai), connexion de la cellule de charge au cordon d'assujettissement, connexion du torse en bois au déclencheur. Comme on peut le voir à la Figure 22, le harnais de sécurité est équipé d'indicateurs d'arrêt de chute (encerclés

en rouge), qui sont censés s'activer lors de l'arrêt d'une chute. Pendant les essais de chute, il a été observé que les indicateurs d'arrêt de chute ne s'activaient pas systématiquement (neuf essais sur 42 où les deux indicateurs sont activés, cinq essais sur 42 où un des deux indicateurs est activé) sans lien apparent avec le type d'essais.



Figure 22 - Torse de bois équipé d'un harnais de sécurité et d'un cordon d'assujettissement avec absorbeur d'énergie de classe E4
(Tirée de Leclerc et Tremblay, 2015).

3.3.2 Instrumentation

Le système d'acquisition des données à haute vitesse utilisé est de marque HBM. Les mesures sont effectuées à un taux de 1200 points par seconde et le système est équipé d'un filtre passe-bas Butterworth à 1000 Hz.

Deux cellules de charge de 44,5 kN (10 000 lb), identifiées par C2 et C3 sur la Figure 12, sont installées à chaque extrémité du câble, comme montré à la Figure 23. Les deux cellules de charge sont de marque Lebow, modèle 3187. La troisième cellule de charge, d'une capacité de 22,3 kN (5 000 lb), fut utilisée pour mesurer la tension dans le cordon d'assujettissement. Cette cellule de charge était installée directement au centre du câble par le biais d'un mousqueton de 22,3 kN (5 000 lb) de résistance de marque Sala SC-408TG, comme illustré à la Figure 24. Cette cellule de charge est également de marque Lebow, modèle 3132.

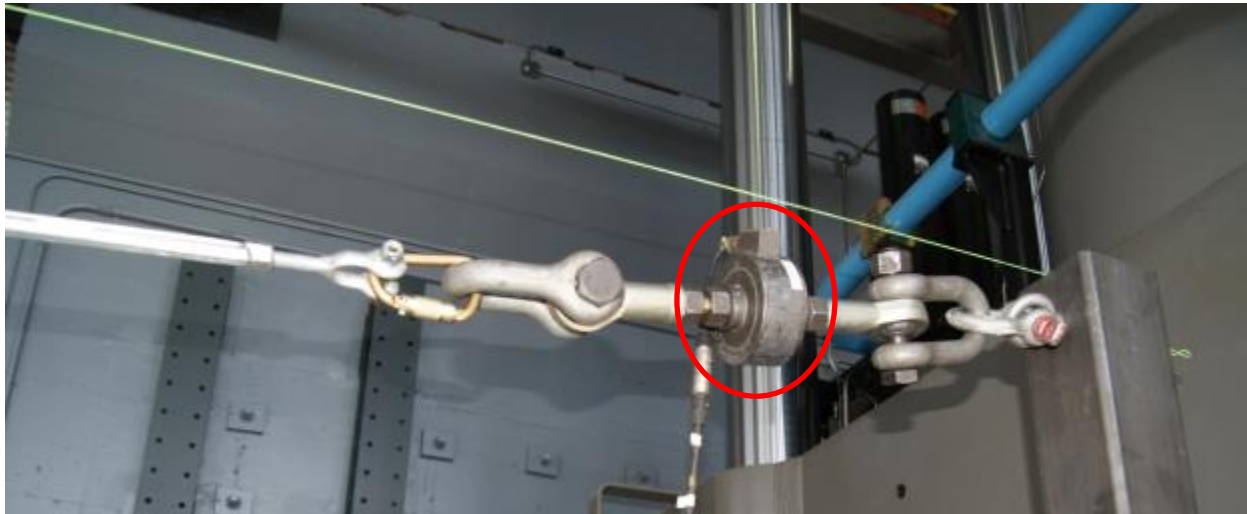


Figure 23 - Cellule de charge de 44,5 kN pour mesurer la tension du câble
(Tirée de Leclerc et Tremblay, 2015).



Figure 24 - Cellule de charge de 22,3 kN pour la tension du cordon d'assujettissement
(Tirée de Leclerc et Tremblay, 2015).

Pour mesurer les flèches lors des essais dynamiques de chute, deux potentiomètres à corde, l'un pour la flèche du câble d'acier, modèle Celesco PT101 avec une course de 1524 mm (60 po) et le second pour la chute totale du torse de bois ou de la masse de 100 kg, modèle Patriot Rayelco P-350A-IT (A159) avec une course de 8890 mm (350 po), sont illustrés à la Figure 25. Le

potentiomètre à corde, mesurant la distance de chute du torse ou de la masse, fut entouré d'une protection en bois pour éviter d'être endommagé en cas de contact avec la masse d'essai.

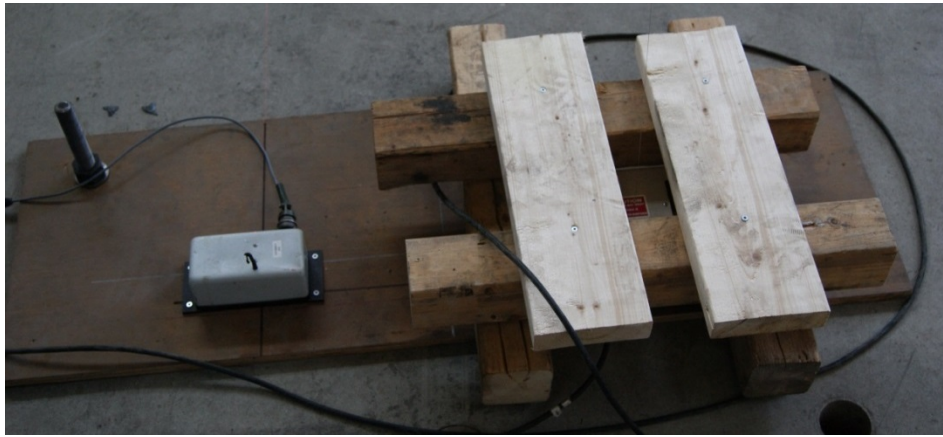


Figure 25 - Potentiomètre à corde
(Tirée de Leclerc et Tremblay, 2015).

Le potentiomètre mesurant la flèche du câble, ne pouvant se situer dans le même axe que la masse en chute, est décalé de 500 mm du centre de la portée et son point d'attache au câble est illustré à la Figure 26. Ce point de mesure n'étant pas situé au centre du câble, une correction est appliquée sur la mesure pour estimer la flèche au centre de la portée à partir de ce point de mesure. La correction consiste à augmenter la mesure par un facteur multiplicateur F_m qui correspond à :

$$F_m = \frac{L}{L-1} \quad (30)$$

où L est la portée du câble en mètre. Par exemple, F_m est égal à 1,25, 1,11 et 1,07 pour une portée L de 5 m, 10 m et 15 m respectivement.



Figure 26 - Point d'attache au câble pour la mesure de la flèche
(Tirée de Leclerc et Tremblay, 2015).

Cette correction est valable dans la mesure où le poids propre du câble devient négligeable par rapport à la charge ponctuelle appliquée au centre de la portée. Avant le déclenchement de la

chute, le facteur de correction surestime donc la flèche initiale et une fois la masse suspendue au câble, la flèche corrigée devient acceptable, comme illustrée à la Figure 27.



Figure 27 - Flèche du câble d'acier engendrée par une masse suspendue de 100 kg à mi-portée (Tirée de Leclerc et Tremblay, 2015).

Pour les essais avec jauges, chaque potelet fut instrumenté de quatre jauges d'extensométrie (deux sur la face avant et les deux autres sur la face arrière), positionnées à une distance $D/2$ de l'appui, où D correspond à la largeur du profilé HSS. L'écart entre les deux jauges positionnées sur une même face correspondait à $D/3$. Les jauges utilisées sont fabriquées par la compagnie Vishay, modèle CEA-06-250UW-120.



Figure 28 - Jauges d'extensométrie (Tirée de Leclerc et Tremblay, 2015).

3.3.3 Dissipation d'énergie durant les essais

Cette section comporte une discussion sur le comportement des différents éléments du SCAH lors de l'arrêt de chute, et notamment sur leur capacité à dissiper de l'énergie.

La Figure 29 présente l'emplacement des jauges de déformation sur les potelets d'ancrage de la CAH, ainsi que les déformations mesurées par chacune de ces huit jauges. On peut observer une déformation symétrique pour les potelets nord et sud, ce qui indique qu'il n'y a pas de phénomènes de torsion en jeu. Le début de la courbe indique l'état du potelet avant la chute. Puis, on peut noter la chute suivie d'un amortissement progressif. La déformation à la fin de l'essai est plus importante qu'au début, du fait du poids du torse en bois retenu à la CAH par son cordon d'assujettissement.

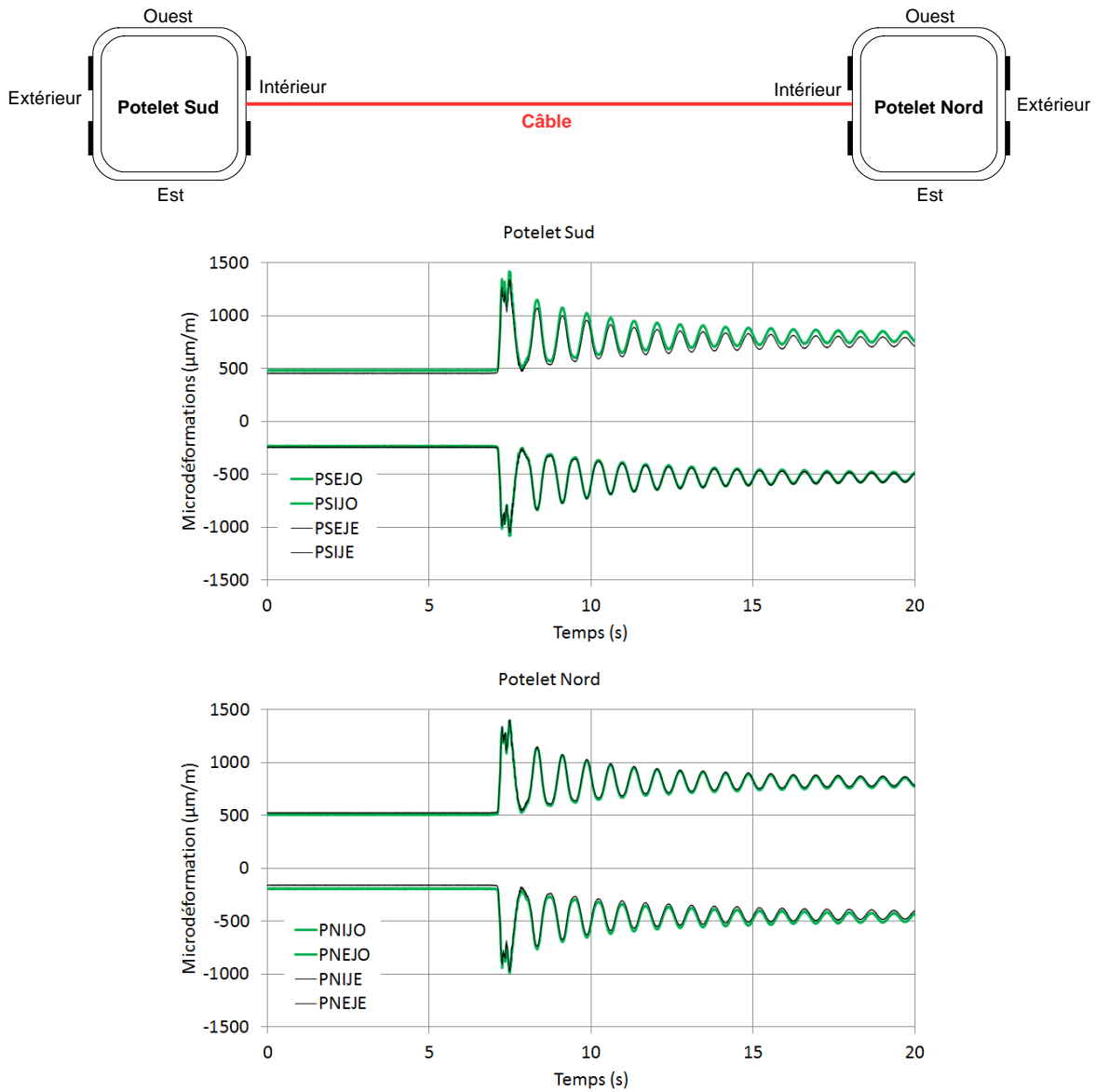


Figure 29 -Torsion des potelets lors de l'arrêt de chute (E-5-15-B-3).

La Figure 30 présente la courbe hystérétique du potelet lors de l'arrêt de chute. Il s'agit de l'enregistrement fourni par la jauge de déformation extérieure Ouest, installée sur le potelet nord du SCAH (Figure 29). On peut remarquer que la déformation initiale n'est pas nulle : des contraintes sont induites dans le potelet lors de sa fixation sur la structure d'accueil. La microdéformation enregistrée est de signe positif, ce qui signale une élévation. Cela correspond tout à fait à l'état de contrainte anticipé sous l'effet de l'arrêt de la chute du travailleur. La courbe hystérétique montre clairement que le comportement du potelet est linéaire élastique. L'acier structural utilisé pour la fabrication de ces potelets ($F_y=350$ MPa) a une déformation limite élastique située autour de $1750 \mu\text{m/m}$. Or, on peut voir que pour l'essai E-5-15-B, soit l'essai le plus critique prévu au protocole, on reste relativement loin de cette limite de plastification (environ 70 %).

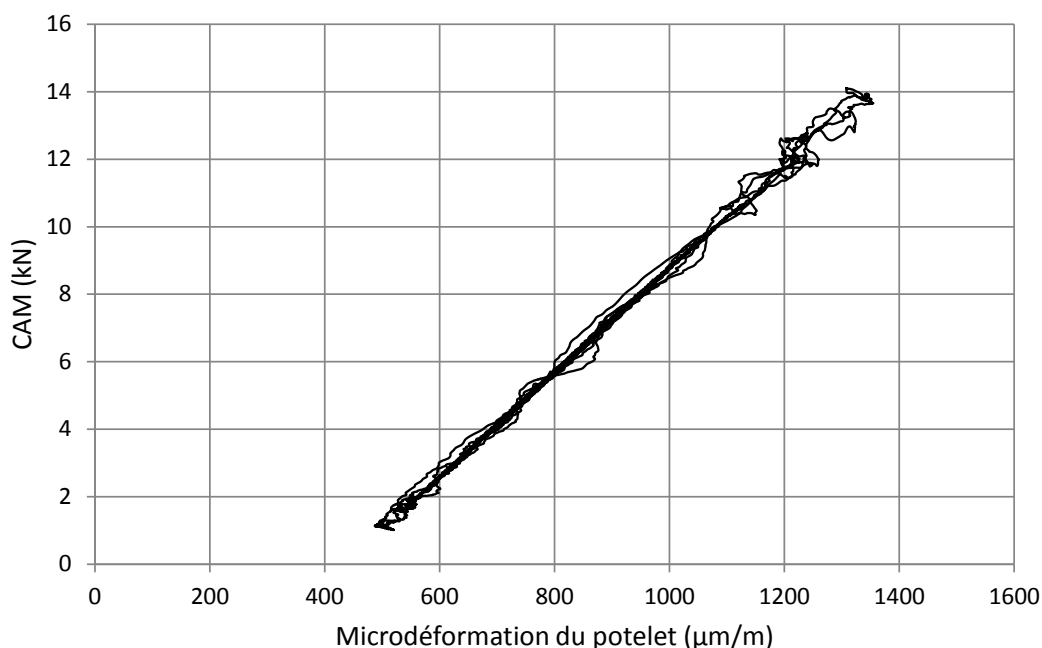


Figure 30 - Courbe hystérétique du potelet (essai E-5-15-B-1).

La Figure 31 montre la courbe hystérétique de l'absorbeur d'énergie. La courbe est tracée en partant de l'extrémité droite (déplacement de 1200 mm, soit la hauteur de chute libre). Le système ne présente aucune résistance jusqu'à un déplacement proche de 0 mm (zone 1), ce qui est tout à fait normal : il s'agit de la chute libre. Puis, on observe une pente linéaire (zone 2) : il s'agit de la mise en tension du cordon d'assujettissement (concomitante avec l'augmentation de la flèche du câble). En faisant abstraction des pics (coutures qui arrivent à la rupture brusquement), on observe ensuite un palier « plastique » (zone 3) qui correspond au déchirement de l'absorbeur d'énergie, avec une force moyenne de l'ordre de 2,8 kN. On peut observer le pic de l'ordre de 3,6 kN dans le cordon d'assujettissement, soit une valeur en deçà de la limite de 4 kN fixée par la norme CSA Z259.11 pour les absorbeurs de classe E4. Enfin, la zone 4 correspond aux oscillations du système (retour à l'équilibre après la chute), dans le domaine élastique.

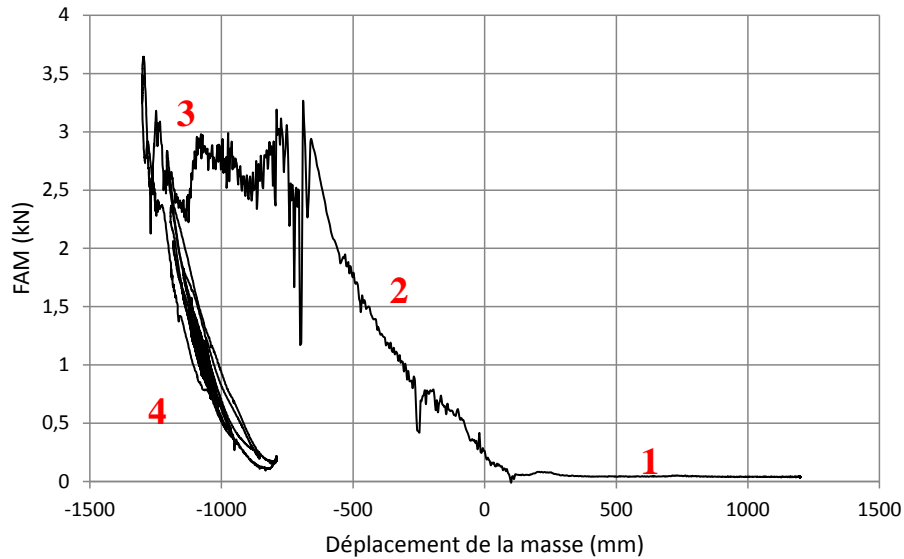


Figure 31 - Courbe hystérétique de l'absorbeur d'énergie (essai E-5-15-B-1).

La Figure 32 illustre la courbe hystérétique du câble. Les valeurs de départ ne sont pas 0 : il y a une certaine tension dans le câble pour avoir une flèche initiale de 300 mm (mise à zéro), et ensuite, le poids de la cellule de charge du cordon d'assujettissement induit une augmentation de la flèche (100 mm) ainsi qu'une légère augmentation de la tension initiale. Le comportement du câble est essentiellement linéaire lors de l'arrêt de chute. Seule la zone *a* identifiée sur la figure correspond à un comportement non linéaire. Lors de l'arrêt de chute, la tension augmente subitement dans le câble, ce qui induit un resserrement des torons, et donc un phénomène de torsion qui conduit à un desserrage partiel du tendeur. Ainsi, il appert que considérer un comportement linéaire pour la méthode analytique est une approximation acceptable.

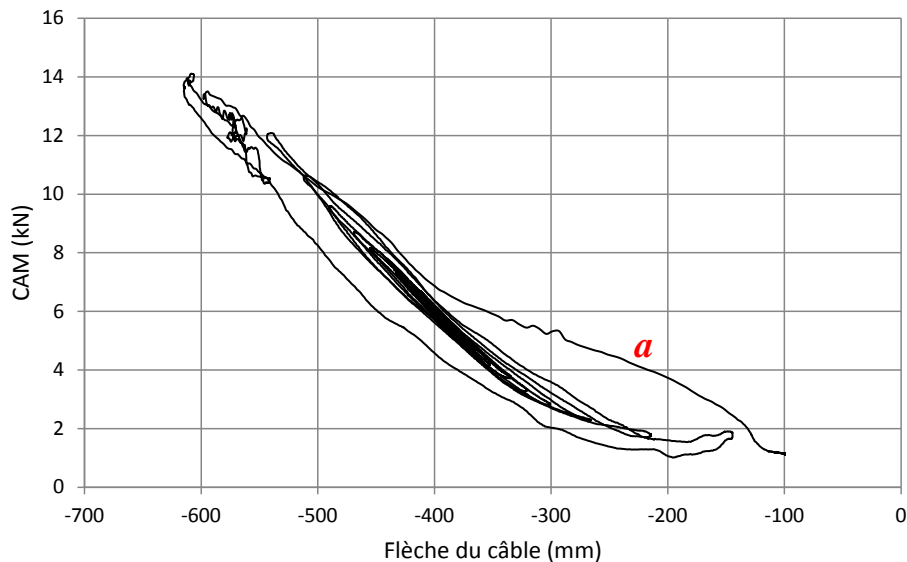


Figure 32 - Courbe hystérétique du câble (essai E-5-15-B-1).

Les résultats présentés dans cette section indiquent que :

- Il n'y a pas de phénomène de torsion dans les potelets lors de l'arrêt de chute, ce qui était l'objectif visé;
- Les potelets restent dans le domaine élastique même pour le cas le plus critique, ce qui signifie que la conception du système lors de la rédaction du protocole a été faite correctement;
- Il y a une dissipation d'énergie dans l'absorbeur lors de l'arrêt de chute, ce qui est attendu;
- La force de déploiement moyenne de l'absorbeur utilisé dans l'essai présenté à la Figure 31 est de l'ordre de 2,8 kN, avec un pic de 3,5 kN (soit une valeur inférieure à la limite de 4 kN fixée par la classe de l'absorbeur);
- Le comportement du câble est essentiellement linéaire, avec quelques non-linéarités correspondant au desserrement du tendeur.

La section suivante présente de manière plus détaillée les résultats d'essais pour les efforts pertinents dans le cadre de la conception du SCAH.

3.4 Résultats des essais

3.4.1 Synthèse des résultats d'essais

Le déploiement moyen de l'absorbeur d'énergie, mesuré lors des essais, est de 720 mm ($\sigma = 33,4$ mm) pour les câbles 1/2 po et 706 mm ($\sigma = 40,6$ mm) pour les câbles de 3/8 po. La différence est trop faible pour pouvoir juger d'un quelconque effet du diamètre du câble sur le déploiement de l'absorbeur.

La Figure 33 résume les CAM moyennes obtenues pour chaque catégorie d'essais. Les résultats sont classés en ordre de portée et de rigidité d'ancrage croissantes. On peut observer que plus la rigidité de l'ancrage augmente, plus la CAM est grande.

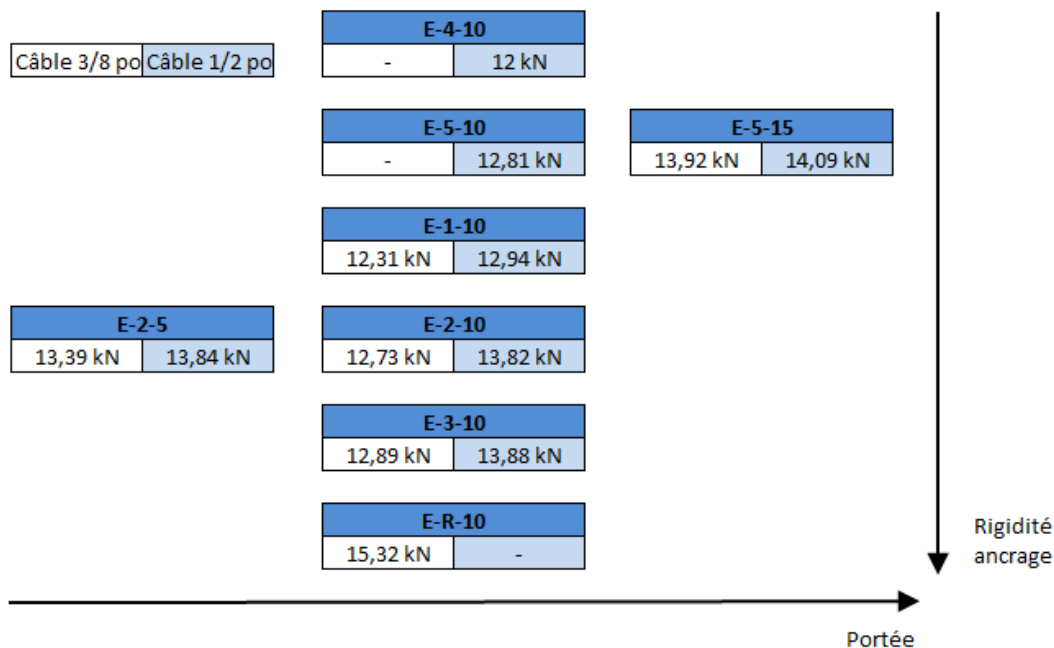


Figure 33 - Charges d'arrêt maximales moyennes pour chaque type d'essais.

En moyenne, la FAM est de 3,06 kN ($\sigma = 0,12$) pour les câbles de 3/8 po et de 3,31 kN ($\sigma = 0,33$) pour les câbles de 1/2 po. La Figure 34 ne permet pas de dégager de tendance nette liant la FAM à la portée ou à la rigidité des ancrages.

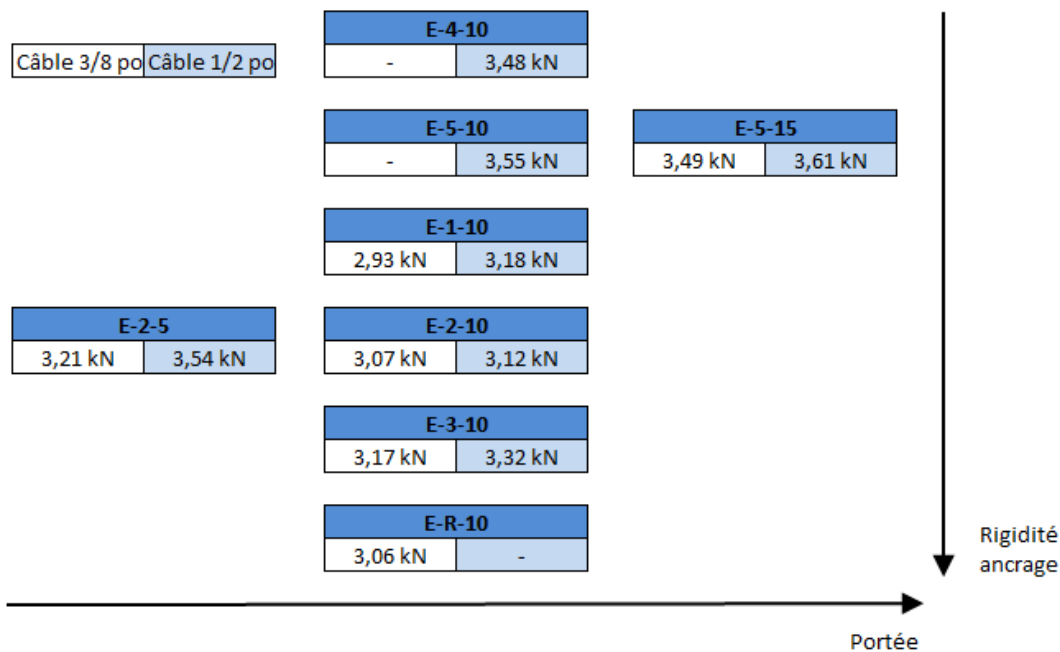


Figure 34 - Forces d'arrêt maximales moyennes pour chaque type d'essais.

La Figure 35 montre que plus la portée est grande, plus la flèche est importante. De même, on remarque que plus l'ancrage est flexible, plus la flèche est grande. Les tendances illustrées aux Figures 33 et 35 étaient anticipées et sont représentées par le modèle analytique simple.

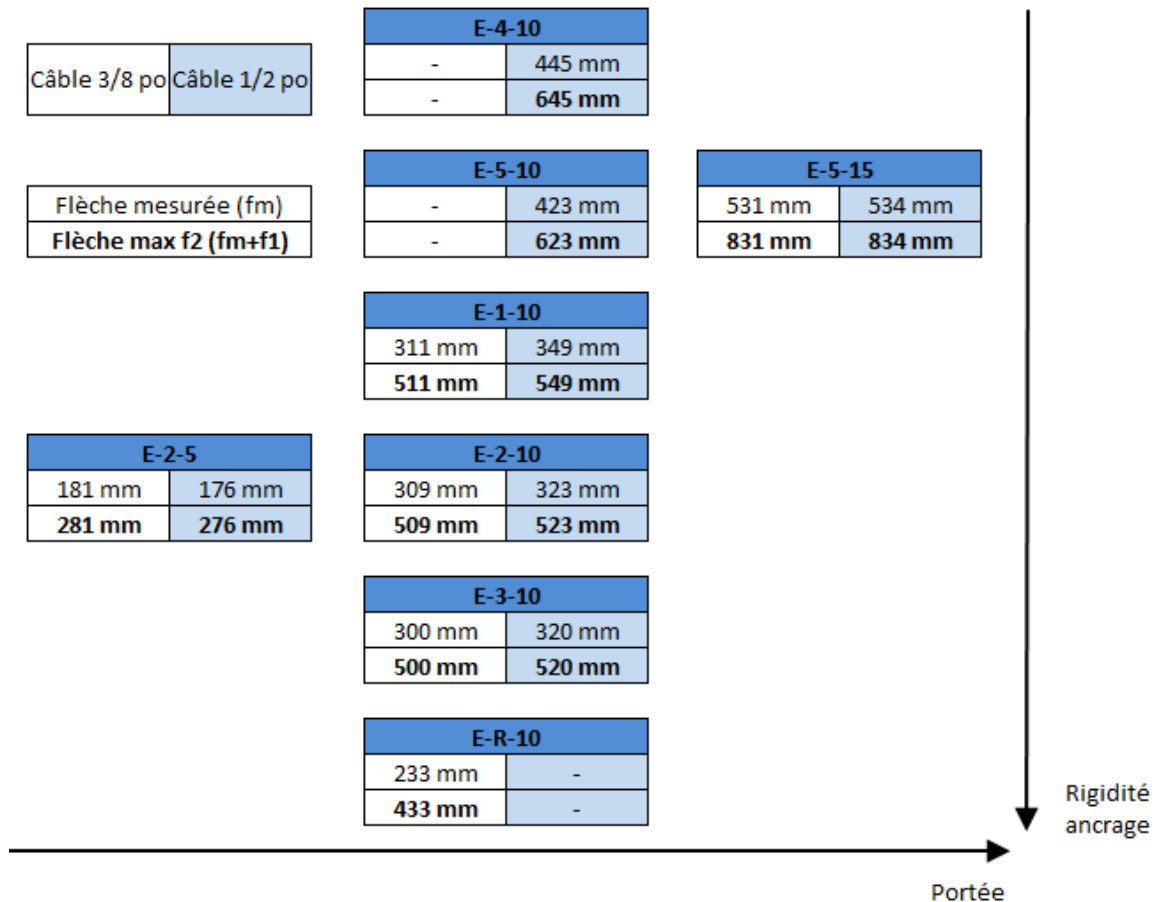


Figure 35 - Flèches maximales moyennes pour chaque type d'essais.

3.4.2 Comparaison des résultats d'essais au tableur

Cette section compare les résultats d'essais aux estimations fournies par le modèle analytique simple. Dans un premier temps, les CAM et les flèches sont comparées pour les FAM mesurées lors des essais (Tableau 11). Puis, les résultats d'essais sont comparés au scénario « conception », c'est-à-dire en considérant une FAM de 4 kN, soit la force de déploiement maximale de l'absorbeur d'énergie.

Pour la CAM, l'écart varie entre -17 et 10 %, ce qui signifie que la méthode de calcul proposée et programmée dans le tableur donne des résultats légèrement conservateurs (sauf pour les ancrages rigides). Néanmoins, à la vue des nombreuses non-linéarités liées aux structures de type câble et à la nature dynamique de l'essai de chute, la méthode simple proposée donne des résultats acceptables. Par ailleurs, l'étude de Sulowski et Miura (1983) indique des écarts entre les mesures expérimentales et les résultats de son modèle de l'ordre de plus ou moins 10 % (mais

cette étude ne considère pas la rigidité des ancrages, et la méthode analytique proposée est plus complexe). Les essais « spéciaux » (ancrages rigides ou flèche initiale très importante) sortent du lot et ne sont pas comptabilisés pour les écarts moyens. Les résultats montrent que l'écart moyen est plus élevé pour les câbles de 1/2 po de diamètre (-14 %) que pour les câbles de 3/8 po de diamètre (-3 %). Pour ce qui est des flèches, la tendance observée montre que la flèche est surestimée dans le cas d'un câble de 3/8 po (-14 % en moyenne), et estimée très fidèlement dans le cas d'un câble de 1/2 po de diamètre (0 % d'écart en moyenne). Pour les câbles de 1/2 po de diamètre, on relève cinq cas où la flèche a été sous-estimée, mais seulement de 2 cm environ, ce qui est très faible en regard de la marge de sécurité considérée dans le calcul du dégagement ou même des incertitudes liées à la taille du travailleur. Dans le cas de la plus grande surestimation de la flèche (E-R-10), les résultats fournis par le modèle analytique simple nous donnent une flèche 13 cm plus grande que celle mesurée lors de l'arrêt de chute. Là encore, cet écart ne nous semble pas être alarmant puisque, d'une part, il est de l'ordre de grandeur des incertitudes sur la taille du travailleur (et étirement du harnais) et que, d'autre part, la surestimation de la flèche joue en faveur d'une plus grande sécurité. Par ailleurs, hors ce cas extrême, la flèche n'est surestimée que de 9 cm dans le cas d'une portée de 15 m.

Tableau 11 - Comparaison des CAM et des flèches mesurées à celles calculées à l'aide de la méthode analytique simple.

Catégorie Essai	Câble	FAM mesurée moyenne (kN)	CAM mesurée moyenne (kN)	CAM calculée (kN)	Écart CAM (%)	Flèche mesurée moyenne (mm)	Flèche calculée (mm)	Écart flèche (%)
E-1-10	A	2,93	12,31	12,6	-2	511	580	-14
E-2-10	A	3,07	12,73	13,4	-5	509	580	-14
E-2-5	A	3,21	13,39	13,4	0	281	300	-7
E-3-10	A	3,17	12,89	13,9	-8	500	570	-14
E-5-15	A	3,49	13,92	14,1	-1	831	940	-13
E-R-10	A	3,06	15,32	13,8	10	433	560	-29
T1-E-2-5	A	3,73	7,26	7,7	-6	621	600	3
E-1-10	B	3,18	12,94	14,8	-14	549	540	2
E-2-10	B	3,12	13,82	15,1	-9	523	520	1
E-2-5	B	3,54	13,84	15,8	-14	276	280	-1
E-3-10	B	3,32	13,88	16,1	-16	520	520	0
E-4-10	B	3,48	12,00	13,7	-14	645	640	1
E-5-10	B	3,55	12,81	15,0	-17	623	600	4
E-5-15	B	3,61	14,09	15,8	-12	834	870	-4
ME-R-10	B	8,13	29,76	31,2	-5	555	650	-17
T1-E-2-5	B	3,71	7,59	7,8	-3	623	600	4

La tendance observée pour le câble B (surestimation de la CAM et légère sous-estimation de la flèche) est liée aux paramètres de flexibilité du câble (module de Young du matériau et section d'acier). Si la rigidité du câble était moindre, on obtiendrait des CAM plus faibles et des flèches plus grandes, soit des résultats se rapprochant de ceux observés pour le câble A. Pour la conception, ou l'évaluation d'un SCAH, les paramètres élastiques des câbles ne seront, dans la plupart des cas, pas connus de manière extrêmement précise (essais de laboratoire). Cependant, les valeurs utilisées, et fournies par le tableur, montrent qu'il est tout de même possible d'avoir une bonne approximation de la CAM et de la flèche, connaissant le diamètre du câble et le matériau qui le compose.

Enfin, il faut souligner que les résultats et les comparaisons du Tableau 11 sont faits en prenant exactement les FAM mesurées lors des essais, ce qui ne sera pas faisable pour la conception d'un SCAH : on utilisera une FAM de 4 kN pour un absorbeur de classe E4. Ainsi, pour tous les cas étudiés et présentés au Tableau 11 (à l'exception de ME-R-10), en considérant une FAM de 4 kN, la CAM et la flèche seront surestimées par la méthode analytique simple, ce qui la rend conservatrice (Tableau 12). La surestimation de la CAM varie de 9 % (1,4 kN) à 34 % (4,4 kN). La flèche, quant à elle, est sous-estimée dans deux cas (23 mm et 11 mm soit 4 % et 2 % d'écart respectivement) et surestimée dans tous les autres cas (avec un maximum de 167 mm, soit 39 %).

Tableau 12 - Comparaison des CAM et des flèches mesurées à celles calculées à l'aide de la méthode analytique simple (FAM = 4 kN).

Catégorie Essai	Câble	FAM mesurée (kN)	Écart FAM (%)	CAM mesurée (kN)	CAM calculée (kN)	Écart CAM (%)	Flèche mesurée (mm)	Flèche calculée (mm)	Écart flèche (%)
E-1-10	A	2,93	-37	12,31	15,7	-28	511	640	-25
E-2-10	A	3,07	-30	12,73	16,1	-26	509	620	-22
E-2-5	A	3,21	-25	13,39	15,6	-17	281	320	-14
E-3-10	A	3,17	-26	12,89	16,4	-27	500	610	-22
E-5-15	A	3,49	-15	13,92	15,5	-11	831	970	-17
E-R-10	A	3,06	-31	15,32	16,7	-9	433	600	-39
T1-E-2-5	A	3,73	-7	7,26	8,3	-14	621	610	2
E-1-10	B	3,18	-26	12,94	17,4	-34	549	580	-6
E-2-10	B	3,12	-28	13,82	18,0	-30	523	560	-7
E-2-5	B	3,54	-13	13,84	17,2	-24	276	290	-5
E-3-10	B	3,32	-20	13,88	18,4	-33	520	550	-6
E-4-10	B	3,48	-15	12,00	15,1	-26	645	670	-4
E-5-10	B	3,55	-13	12,81	16,3	-27	623	620	0
E-5-15	B	3,61	-11	14,09	17,0	-21	834	890	-7
T1-E-2-5	B	3,71	-8	7,59	8,4	-11	623	600	4

Enfin, il faut noter que la rigidité réelle du montage est plus faible que celle considérée par le tableur. En effet, la rigidité des colonnes d'ancrage, bien que plus élevée que celle des potelets, a une influence sur les résultats : la rigidité considérée dans le calcul du tableur étant plus grande, les résultats devraient être conservateurs en termes de tension dans le câble, et légèrement sous-estimés pour la flèche. Cela dit, lors de la conception, l'ingénieur ne connaîtra pas nécessairement la rigidité de la structure d'accueil et n'en tiendra donc pas compte dans le calcul. Les résultats calculés par le tableur représentent donc l'estimation qui serait faite pour la conception d'un SCAH à installer sur un chantier.

3.4.3 Résultats d'essais détaillés

Les Tableaux 13 à 22 présentent les résultats détaillés pour chacun des essais effectués au Laboratoire de structures de l'École Polytechnique. Les écarts dans la CAM peuvent aller jusqu'à 18 % d'un essai à l'autre, en fonction du comportement de l'absorbeur d'énergie. Les résultats obtenus à l'aide du modèle analytique simple donnent des estimations du même ordre de grandeur. Étant donné l'incertitude sur la FAM développée par l'absorbeur d'énergie, il serait préférable d'utiliser la valeur maximale nominale correspondant à la classe de l'absorbeur (soit 4 kN dans ce cas) pour concevoir les SCAH.

Tableau 13 - Résultats d'essais dynamiques de chute pour le montage E-1-10.

E-1-10					
Nomenclature	Allongement absorbeur (mm)	Flèche (mm)	FAM (kN)	CAM Nord (kN)	CAM Sud (kN)
E-1-10-A-1	724	512	2,92	12,23	12,20
E-1-10-A-2	737	510	2,93	12,37	12,45
E-1-10-B-1	686	556	3,25	12,99	13,11
E-1-10-B-2	648	541	3,11	12,76	12,90

Tableau 14 - Résultats d'essais dynamiques de chute pour le montage E-2-10.

E-2-10					
Nomenclature	Allongement absorbeur (mm)	Flèche (mm)	FAM (kN)	CAM Nord (kN)	CAM Sud (kN)
E-2-10-A-1	762	505	3,04	12,80	12,68
E-2-10-A-2	749	521	3,02	12,77	12,89
E-2-10-A-3	699	499	3,15	12,64	12,62
E-2-10-B-1	762	521	3,23	13,63	13,70
E-2-10-B-2	730	525	3,13	13,54	13,68
E-2-10-B-3	711	523	2,99	14,21	14,17

Tableau 15 - Résultats d'essais dynamiques de chute pour le montage E-3-10.

E-3-10					
Nomenclature	Allongement absorbeur (mm)	Flèche (mm)	FAM (kN)	CAM Nord (kN)	CAM Sud (kN)
E-3-10-A-1	775	519	3,04	12,82	12,67
E-3-10-A-2	711	480	3,29	13,03	13,04
E-3-10-B-1	692	539	3,48	13,90	13,94
E-3-10-B-2	724	499	3,15	13,77	13,90

Tableau 16 - Résultats d'essais dynamiques de chute pour le montage E-4-10.

E-4-10					
Nomenclature	Allongement absorbeur (mm)	Flèche (mm)	FAM (kN)	CAM Nord (kN)	CAM Sud (kN)
E-4-10-B-1	673	666	3,87	12,7	12,61
E-4-10-B-2	711	626	3,09	10,92	11,79

Tableau 17 - Résultats d'essais dynamiques de chute pour le montage E-5-10.

E-5-10					
Nomenclature	Allongement absorbeur (mm)	Flèche (mm)	FAM (kN)	CAM Nord (kN)	CAM Sud (kN)
E-5-10-B-1	673	644	3,94	13,81	13,91
E-5-10-B-2	762	602	3,16	11,74	11,78

Tableau 18 - Résultats d'essais dynamiques de chute pour le montage E-5-15.

E-5-15					
Nomenclature	Allongement absorbeur (mm)	Flèche (mm)	FAM (kN)	CAM Nord (kN)	CAM Sud (kN)
E-5-15-A-1	635	855	3,50	13,22	13,37
E-5-15-A-2	635	823	3,50	14,00	14,21
E-5-15-A-3	610	813	3,47	14,03	14,69
E-5-15-B-1	635	846	-	12,91	12,91
E-5-15-B-1*	591	815	3,64	14,11	14,14
E-5-15-B-2	629	825	3,41	13,68	13,66
E-5-15-B-3	610	848	3,77	14,43	14,55

* Essai refait à cause d'un problème de mesure de la FAM lors de l'essai E-5-15-B-1.

Tableau 19 - Résultats d'essais dynamiques de chute pour le montage E-R-10.

E-R-10					
Nomenclature	Allongement absorbeur (mm)	Flèche (mm)	FAM (kN)	CAM Nord (kN)	CAM Sud (kN)
E-R-10-A-1	724	440	2,95	13,49	14,69
E-R-10-A-2	686	434	-	15,24	17,25
E-R-10-A-2*	635	431	3,17	15,25	16,75
E-R-10-A-3	686	431	3,06	14,70	14,82

* Essai refait à cause d'un problème de mesure de la FAM lors de l'essai E-R-10-A-2.

Tableau 20 - Résultats d'essais dynamiques de chute pour le montage E-2-5.

E-2-5					
Nomenclature	Allongement absorbeur (mm)	Flèche (mm)	FAM (kN)	CAM Nord (kN)	CAM Sud (kN)
E-2-5-A-1	660	299	3,15	12,52	12,72
E-2-5-A-2	737	277	3,24	13,34	13,39
E-2-5-A-3	673	268	3,25	14,13	14,26
E-2-5-B-1	660	299	3,72	12,56	12,70
E-2-5-B-2	679	271	3,81	14,75	14,87
E-2-5-B-3	667	259	3,10	14,08	14,09

Tableau 21 - Résultats d'essais dynamiques de chute pour le montage T1E-2-5.

T1E-2-5					
Nomenclature	Allongement absorbeur (mm)	Flèche (mm)	FAM (kN)	CAM Nord (kN)	CAM Sud (kN)
T1E-2-5-A-1	648	618	3,69	7,09	7,30
T1E-2-5-A-2	718	622	3,67	7,06	7,12
T1E-2-5-A-3	679	623	3,78	7,19	7,82
T1E-2-5-B-1	699	630	3,64	7,15	7,61
T1E-2-5-B-2	635	631	3,90	7,79	8,04
T1E-2-5-B-3	705	607	3,59	7,24	7,69

Tableau 22 - Résultats d'essais dynamiques de chute pour le montage ME-R-10.

ME-R-10					
Nomenclature	Allongement longe (mm)	Flèche (mm)	FAM (kN)	CAM Nord (kN)	CAM Sud (kN)
ME-R-10-B-1	102	591	8,17	28,39	28,21
ME-R-10-B-2	114	544	8,16	30,40	30,50
ME-R-10-B-3	102	531	8,06	30,61	30,43

4. ÉTUDE NUMÉRIQUE

L'étude numérique vise à valider les résultats recueillis par la méthode analytique simple, à comparer les résultats obtenus avec un modèle avancé à ceux obtenus expérimentalement, et à étendre la validité du modèle analytique simple pour les cas qui n'auront pas été testés au laboratoire (travées multiples, FAM > 4 kN, position de la charge sur le câble, flexibilité des ancrages, etc.).

4.1 Choix d'un logiciel d'analyse

Une recherche de logiciels commerciaux d'analyse des structures en mesure de modéliser les SCAH a été menée. Parmi les 32 logiciels répertoriés, trois critères principaux étaient recherchés : éléments de type câble disponibles, éléments de type câbles *caténaire*, mode d'analyse dynamique temporelle. Parfois les logiciels d'analyse des structures offrent seulement une analyse dynamique limitée : analyse modale (modes de vibrations et masses modales participantes), analyse spectrale (pour la partie analyse sismique).

L'information n'est pas toujours très évidente à trouver pour mettre en œuvre ces logiciels. D'autre part, il est possible d'utiliser des éléments linéaires de type poutre pour modéliser, de façon rudimentaire, un câble (soumis à de la tension uniquement), notamment pour des ponts suspendus, mais ce type de modélisation n'est pas envisageable pour une CAH de grande portée.

Sur les 32 logiciels, seuls quatre répondaient aux trois critères cités plus haut. C'est le logiciel SAP2000 qui a été choisi pour réaliser les essais simulés numériquement. Il a été sélectionné pour plusieurs raisons :

- il est adapté à la résolution de problèmes dynamiques et offre le choix de plusieurs méthodes d'intégration directe (Newmark- β , Hilbert-Hughes-Taylor- α ...);
- il est connu dans le milieu des ingénieurs en structure;
- il est couramment utilisé en recherche et enseigné dans les milieux universitaires;
- il a servi à plusieurs reprises à valider des méthodes d'analyse ou des codes de calcul pour les câbles (Huu-Thai et Seung-Eock, 2011).

Les deux paramètres principaux utilisés pour la conception d'un SCAH sont : la charge d'arrêt maximale (force maximale du câble appliquée au point d'ancrage) et la flèche maximale du câble. Ces paramètres sont étudiés avec le modèle numérique en fonction de:

- rigidité des ancrages : infiniment rigides, ou représentés par des potelets de mêmes dimensions que ceux utilisés dans le plan expérimental;
- position de la charge sur le câble;
- type d'absorbeur d'énergie (classe E4 ou E6) et conditions de température (valeur de la FAM);
- portée du câble;
- nombre de portées;

- variation de longueur d'une portée sur un câble à plusieurs portées;
- diamètre du câble en acier;
- type de câble (acier ou synthétique);
- tension initiale dans le câble;
- nombre de travailleurs chutant en même temps.

Il est à noter que chaque catégorie d'essais expérimentaux (chapitre 3) est reproduite à l'aide du logiciel afin de comparer les résultats. L'intérêt de la modélisation numérique est qu'elle permet de discuter de la précision des résultats par rapport aux mesures expérimentales. Les essais numériques servent également à étendre les conclusions de la campagne d'essais aux paramètres variables qui n'ont pu être testés en laboratoire.

4.2 Modèle numérique

L'élément câble dans SAP2000 est un élément caténaire élastique non linéaire représentant un câble soumis à son poids propre, à des variations de température, aux déformations et à différents chargements. Le comportement de l'élément est hautement non linéaire et inclut les effets de la rigidification lors de la mise sous tension (P-delta) ainsi que les grands déplacements (CSI, 2014).

Le modèle numérique est présenté à la Figure 36. Le câble est découpé en 20 tronçons et la charge est appliquée au centre de la travée. Les potelets sont des éléments linéaires et les sections HSS sont directement sélectionnées par le logiciel. C'est notamment l'un des avantages lorsque l'on utilise un logiciel de structures : tous les HSS sont inclus, avec leurs dimensions et propriétés géométriques précises. Les potelets sont encastrés à la base. Il est par contre impossible de détailler la connexion du câble au HSS; pour ce faire, il faudrait utiliser un logiciel d'élément fini adapté à la mécanique des milieux non continus. Les analyses sont faites en considérant les non linéarités géométriques pour représenter fidèlement le comportement du câble.

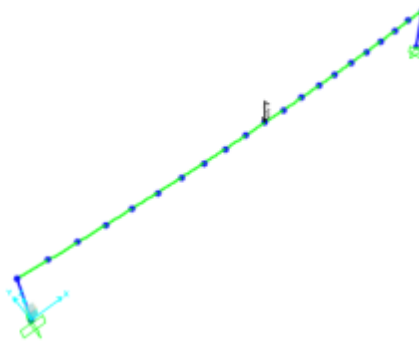


Figure 36 - Chargement appliqué sur le SCAH.

Le module de Young (E) est considéré égal à 200 GPa pour les potelets et 64,8 GPa pour le câble (donnée du fabricant répertoriée dans Sulowski et Miura, 1983). La section typique d'un câble de construction 7x19 est donnée à la Figure 37 et son diamètre nominal est à peu près égal à 15 fois le diamètre d'un fil. Ainsi il est possible d'estimer la section d'acier réelle de ce type de câble (Tableau 23).

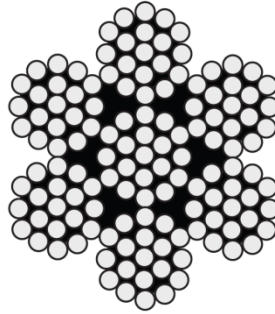


Figure 37 - Câble de construction 7x19.

Tableau 23 - Calcul de la section d'acier du câble.

Diamètre du câble	E (GPa)	Construction	F Rupture (kN)	Diamètre du fil (mm)	Section acier (mm ²)
1/4 po (6,4 mm)	64,8	7x19	22	0,423	18,72
5/16 po (7,9 mm)	64,8	7x19	34	0,527	28,97
3/8 po (9,5 mm)	64,8	7x19	49	0,633	41,90
1/2 po (12,7 mm)	64,8	6x19	89	0,847	64,18
5/8 po (15,9 mm)	64,8	6x19	137	1,060	100,60

Pour les analyses statiques, une charge est appliquée au centre de la travée. Cette charge est considérée égale aux valeurs mesurées expérimentalement ou bien à une valeur choisie : 4 kN pour un absorbeur de classe E4, par exemple. Les analyses sont non linéaires et incluent les effets P-delta. Les résultats obtenus avec SAP2000 sont présentés aux Figures 38 et 39.

Pour les analyses dynamiques, une charge de 1 kN est appliquée au centre de la travée et multipliée par une fonction de chargement qui correspond à un enregistrement de la force dans le cordon d'assujettissement lors des essais au Laboratoire de structures de l'École Polytechnique (ou à une fonction de charge idéalisée). Un amortissement proportionnel à la masse de 5 % est considéré pour les analyses dynamiques. Les analyses dynamiques non-linéaires sont faites en intégration directe. La méthode d'intégration directe utilisée est celle de HHT- α (Hilbert-Hughes-Taylor- α), méthode dite de « l'accélération moyenne » ($\alpha=0$, $\beta=0,25$, $\gamma=0,5$). Avec ces paramètres, la méthode HHT- α est en fait la même que Newmark- β . Ce type de méthode d'intégration directe présente deux avantages majeurs : il n'y a pas d'amortissement numérique et elle est inconditionnellement stable (Chopra, 2007).

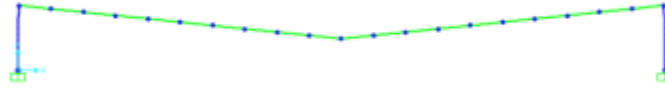


Figure 38 - Déformée sous la charge de 4 kN (statique).

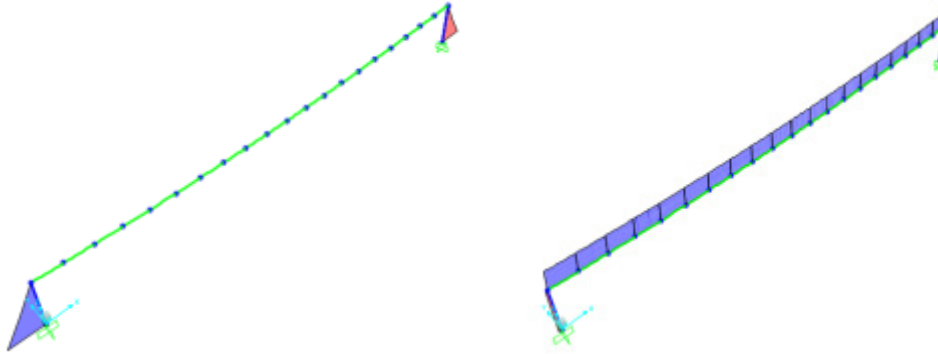


Figure 39 - Moments fléchissants (à gauche) et forces axiales (à droite).

4.3 Analyse statique

4.3.1 Comparaison avec le tableur

Le Tableau 24 présente une comparaison des résultats obtenus avec le tableur Excel à ceux donnés par le modèle numérique. Cette comparaison porte essentiellement sur des configurations de SCAH testées au laboratoire (chapitre 3).

Outre les essais réalisés au laboratoire, d'autres configurations ont été testées. Notamment avec un potelet « 6 », qui est un HSS 127x127x6,4 de 2,5 m de hauteur (ayant une rigidité de 271 kN/m, soit une valeur très faible en regard des profilés testés au laboratoire). La série d'essais E-5-15 a aussi été réalisée avec un potelet en aluminium, ayant une rigidité de 432 kN/m contre 1253 kN/m en acier, soit presque trois fois moins. Enfin, la série E-2-15-B a également été comparée avec des charges de 5 kN (absorbeur de classe E4 gelé, sec), 6 kN (absorbeur de classe E4 gelé, humide, ou absorbeur de classe E6 à température ambiante), 7 kN (absorbeur de classe E6 gelé, sec) et 8 kN (absorbeur de classe E6 gelé, humide).

La comparaison des résultats montre que le modèle théorique fonctionne très bien et représente fidèlement l'influence de la rigidité des ancrages : l'écart moyen est de 0,3 % pour la CAM et 1,3 % pour la flèche f_2 . L'hypothèse la plus réductrice, dans la version numérique comme dans le modèle théorique, est que les calculs sont effectués pour une force statique. La section 4.4 présente une comparaison pour le cas dynamique.

Tableau 24 - Comparaison des résultats obtenus avec le tableur et SAP2000.

Essai	CAM (T, en kN)			Flèche (f2, en m)		
	Tableur Excel	SAP2000	Écart (%)	Tableur Excel	SAP2000	Écart (%)
E-1-10-A	15,73	15,73	0,0	0,639	0,643	0,6
E-1-10-B	17,36	17,38	0,1	0,581	0,582	0,2
E-2-5-A	15,62	15,57	-0,3	0,321	0,326	1,5
E-2-5-B	17,20	17,13	-0,4	0,292	0,296	1,4
E-2-10-A	16,13	16,14	0,1	0,623	0,626	0,5
E-2-10-B	17,98	18,00	0,1	0,561	0,562	0,2
E-2-15-A	16,32	16,44	0,7	0,926	0,941	1,6
E-2-15-B	18,28	18,46	1,0	0,831	0,841	1,2
E-3-10-A	16,41	16,48	0,4	0,612	0,621	1,4
E-3-10-B	18,42	18,53	0,6	0,547	0,553	1,1
E-4-10-A	14,08	14,05	-0,2	0,713	0,726	1,8
E-4-10-B	15,05	15,02	-0,2	0,670	0,680	1,5
E-5-15-A	15,50	15,56	0,4	0,974	0,993	1,9
E-5-15-B	17,02	17,11	0,5	0,892	0,905	1,4
E-6-15-A	12,92	12,86	-0,5	1,169	1,196	2,3
E-6-15-B	13,58	13,53	-0,4	1,118	1,14	1,9
E-5-15-A-ALU	13,92	13,89	-0,2	1,085	1,109	2,2
E-5-15-B-ALU	14,84	14,82	-0,1	1,023	1,042	1,8
E-2-15-B 5kN	21,40	21,57	0,8	0,884	0,897	1,4
E-2-15-B 6kN	24,33	24,48	0,6	0,932	0,947	1,6
E-2-15-B 7kN	27,10	27,24	0,5	0,975	0,992	1,7
E-2-15-B 8kN	29,75	29,87	0,4	1,014	1,033	1,8
T1-E-2-5-A	8,27	8,34	0,8	0,606	0,619	2,1
T1-E-2-5-B	8,41	8,49	0,9	0,597	0,608	1,8
E-R-10-A	16,72	16,83	0,7	0,601	0,61	1,5
E-R-10-B	18,94	19,11	0,9	0,532	0,537	0,9

Moyenne	0,3
Écart type	0,00468

Moyenne	1,4
Écart type	0,00567

4.3.2 Influence de l'emplacement de la charge

Par défaut, en nous appuyant sur les observations de Sulowski et Miura (1983), nous avons considéré uniquement le cas d'une chute de travailleur au centre de la travée, ce cas étant *a priori* le plus critique. Cette section présente une brève vérification de l'hypothèse considérée.

Le modèle utilisé pour étudier l'influence de l'emplacement de la charge sur les efforts dans le câble et sur la flèche maximale est le E-4-10-B (Figure 40). Le Tableau 25 présente les résultats obtenus. Lorsque la position de la charge est à 5 m, cela signifie que celle-ci est au centre de la travée, lorsque la position de la charge est à 0,5 m, la charge se trouve à 0,5 m de l'ancrage de gauche (Figure 40).

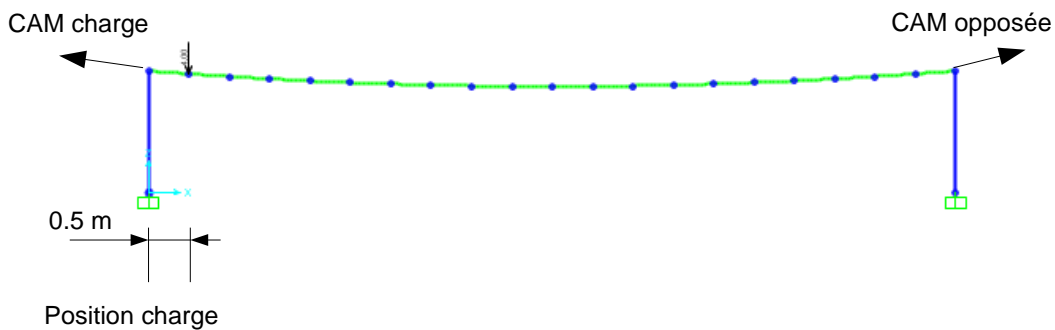


Figure 40 - Modèle E-4-10-B pour étudier l'effet de la position de la charge.

Le Tableau 25 montre que, comme le suggéraient Sulowski et Miura (1983), l'emplacement le plus défavorable pour la chute est au centre de la travée. Ainsi, c'est en supposant une chute d'un travailleur au centre de la travée que l'on peut concevoir un SCAH sécuritaire.

Tableau 25 - Influence de la position de la charge sur la réponse du câble.

Position charge (m)	CAM charge (kN)	CAM opposée (kN)	Flèche f_2 (m)
0,5	8,81	7,93	0,382
1,0	10,81	10,19	0,469
1,5	12,11	11,63	0,530
2,0	13,05	12,66	0,575
2,5	13,74	13,44	0,610
3,0	14,25	14,02	0,637
3,5	14,62	14,45	0,656
4,0	14,86	14,75	0,670
4,5	15,00	14,94	0,678
5,0	15,02	15,02	0,680

4.3.3 SCAH à travées multiples

Le plan expérimental n'a pas couvert le cas des SCAH à plusieurs travées. Ce cas de figure est uniquement étudié à partir de modèles numériques. La Figure 41 présente la déformée d'un SCAH à deux travées de 10 m, avec une charge de 4 kN au centre de la travée de gauche.

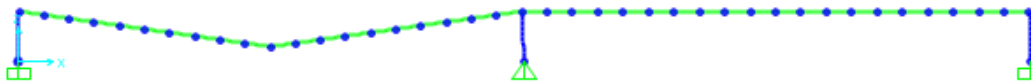


Figure 41 - Modèle de câble à deux travées de 10 m.

Le **Tableau 26** présente une comparaison des résultats obtenus avec le tableur et ceux des modèles numériques pour différentes configurations de SCAH à travées multiples. Dans ce tableau, seul le cas de travées d'égales longueurs est présenté.

Le **Tableau 26** montre que la méthode théorique implantée au tableur donne de bons résultats. L'écart moyen observé est de -1,4 % pour la CAM et -3,5 % pour la flèche. Dans les deux cas, en général, le tableur surestime légèrement les efforts dans le câble et la flèche, ce qui est conservateur.

Pour les travées non régulières, le CTICM indique que l'on peut utiliser les mêmes formules que pour les travées régulières et considérer n comme suit :

$$n = \frac{\text{longueur totale du câble}}{\text{longueur de la plus longue travée}} \quad (31)$$

Si l'hypothèse du CTICM est exacte, il ne devrait pas y avoir de différence significative dans la tension et la flèche maximales pour les modèles présentés à la Figure 42, car pour tous ces cas, la longueur totale du câble est de 30 m et la longueur de la plus grande travée est de 15 m, soit $n = 2$.

Tableau 26 - Comparaison des résultats du tableur et de SAP2000 pour les SCAH à plusieurs travées.

Essai	CAM (T, en kN)			Flèche (f2, en m)		
	Tableur Excel	SAP2000	Écart (%)	Tableur Excel	SAP2000	Écart (%)
E-2-10-B	18,0	18,00	0,0	0,56	0,562	0,4
E-2-10-B 2 travées	14,8	14,49	-2,1	0,70	0,698	-0,3
E-2-10-B 2 travées, 1 travailleur par portée	18,0	18,53	2,9	0,56	0,550	-1,8
E-2-10-B 2 travées, 2 travailleurs sur 1 portée (= 8 kN)	24,1	23,64	-1,9	0,89	0,850	-4,7
E-2-10-B 3 travées	13,2	12,64	-4,4	0,80	0,799	-0,1
E-2-10-B 3 travées, 1 travailleur par portée	18,0	18,72	3,8	0,56	0,540	-3,7
E-2-10-B 3 travées, 2 travailleurs sur 1 portée (= 8 kN)	21,5	20,70	-3,9	1,09	0,975	-11,8
E-2-10-B 4 travées	12,3	11,44	-7,5	0,88	0,883	0,3
E-2-10-B 4 travées, 1 travailleur par portée	18,0	18,82	4,4	0,56	0,537	-4,3
E-2-10-B 4 travées, 2 travailleurs sur 1 portée (= 8 kN)	19,9	18,92	-5,2	1,07	1,066	-0,4
E-2-10-B 5 travées	11,6	10,63	-9,1	0,93	0,950	2,1
E-2-10-B 5 travées, 1 travailleur par portée	18,0	18,87	4,6	0,56	0,536	-4,5
E-2-10-B 5 travées, 2 travailleurs sur 1 portée (= 8 kN)	18,9	17,57	-7,6	1,14	1,148	0,7
E-5-10-B 4 travées	11,1	11,15	0,4	0,97	0,906	-7,1
E-6-10-B 4 travées	8,5	9,89	14,1	1,27	1,021	-24,4
E-R-10-B 4 travées	12,9	11,65	-10,7	0,83	0,867	4,3

Moyenne	-1,4
Écart type	0,064

Moyenne	-3,5
Écart type	0,068

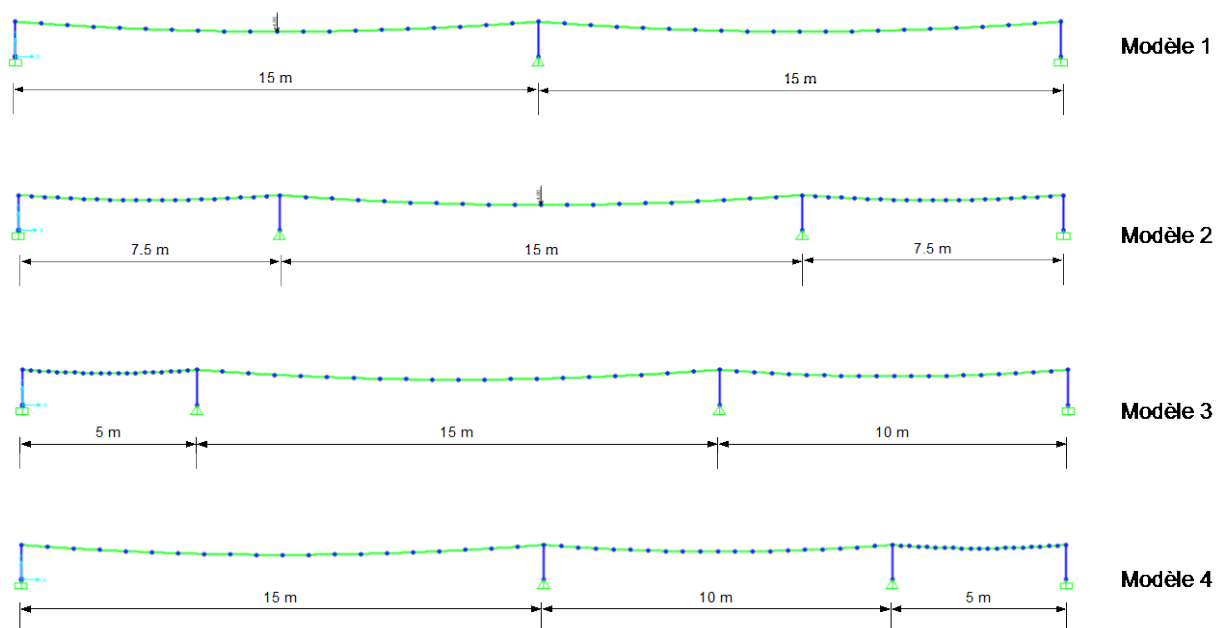


Figure 42 - Modèles de câble à travées multiples irrégulières.

Comme le montre le Tableau 27, l’hypothèse du CTICM est fondée : cela permet donc d’utiliser le tableur pour le calcul des SCAH à travées multiples non régulières.

Tableau 27 - Effort et flèche dans le câble pour les différentes configurations.

Modèle	CAM (kN)	Flèche f2 (m)
1	14,72	1,05
2	14,63	1,051
3	14,61	1,051
4	14,69	1,052

L’influence d’une travée irrégulière est étudiée à l’aide du modèle de la Figure 43. La travée centrale a une portée allant de 10 à 30 m (Tableau 28).

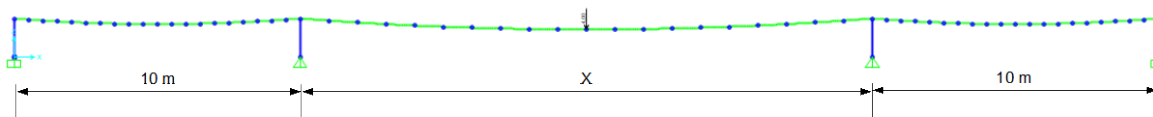


Figure 43 - Modèle avec portée centrale de longueur variable.

Le Tableau 28 montre que la flèche est plutôt bien estimée par le tableur, quelle que soit la portée de la travée centrale. Par contre, la CAM est surestimée pour $n = 3$ et sous-estimée pour $n = 1,67$. Cependant, l'écart maximal de 3,6 %, est très satisfaisant et n'entraînera pas de situation dangereuse pour peu que des coefficients de sécurité raisonnables soient considérés.

Tableau 28 - Influence d'une portée centrale de longueur variable.

X (m)	n	SAP2000		Excel	
		CAM (kN)	Flèche (m)	CAM (kN)	Flèche (m)
10	3,00	12,66	0,805	13,20	0,800
15	2,33	13,95	1,106	14,95	1,053
20	2,00	14,83	1,401	15,20	1,380
25	1,80	15,48	1,694	15,10	1,729
30	1,67	16,01	1,985	15,43	2,032

4.3.4 Câble synthétique

Une des difficultés liées à la conception d'un SCAH dont le câble est en matériau synthétique réside dans la détermination des propriétés mécaniques de la corde. En effet, la plupart du temps, ces propriétés mécaniques ne sont pas fournies par les manufacturiers, qui indiquent simplement la charge maximale d'utilisation et la charge maximale à la rupture. Or, dans le cadre de la conception d'un SCAH, il est primordial de connaître le module de Young du matériau constituant la corde, puisque de lui vont dépendre la CAM et la flèche maximales. Un module de Young surestimé va entraîner une CAM plus grande dans les calculs (ce qui n'est pas dangereux), mais également une sous-estimation de la flèche, ce qui peut avoir des conséquences graves pour le travailleur. En effet, on peut voir au Tableau 29 que lorsque l'on prend un module de Young (E) à 3 GPa, la CAM est plus forte (environ 10 kN), mais la flèche plus faible (environ 1 m) que lorsque l'on choisit $E = 0,25$ GPa. Or, si dans la réalité $E = 0,25$ GPa, le câble n'arrachera pas les ancrages, mais la chute du travailleur s'arrêtera à environ 1,3 m plus bas que prévu (soit 1,3 fois la hauteur de sécurité prévue dans un calcul de dégagement).

Tableau 29 - Résultats pour un câble synthétique en fonction de ses propriétés mécaniques (modèle E-2-10).

Caractéristiques de la corde	CAM (kN)	Flèche f_2 (m)
d=1/2 po ; E = 3 GPa	9,06	1,13
d=5/8 po ; E = 3 GPa	10,41	0,98
d=1/2 po ; E = 0,25 GPa	4,25	2,68
d=5/8 po ; E = 0,25 GPa	4,84	2,28

Étant donné les incertitudes liées aux propriétés mécaniques des câbles synthétiques et les risques pouvant en découler pour la conception d'un SCAH, nous avons choisi de ne pas

proposer ce type de câble directement dans le tableur de calcul. La méthode analytique simple ne devrait pas être utilisée pour la conception d'un SCAH avec câble synthétique.

4.4 Analyse dynamique

La difficulté d'une analyse dynamique d'un SCAH avec un logiciel de structure réside dans l'impossibilité de représenter une masse tombant, avec un calcul automatique des efforts générés dans le cordon d'assujettissement. Pour contourner ce problème, il faut utiliser un chargement fixe (dans notre cas une force de 1 kN appliquée au centre de la travée), que l'on multiplie par une fonction de chargement, dont l'ordonnée varie en fonction du temps. Cette fonction de charge peut être directement mesurée lors des essais (afin de valider le modèle numérique) ou bien on peut envisager d'utiliser une fonction de charge idéalisée (à favoriser dans le cadre de la conception d'un SCAH). Ces deux types de fonction de charge sont présentés à la Figure 44. On peut remarquer que nous avons fait le choix d'imposer une force constante (1 kN) après l'arrêt de chute, plutôt qu'une sinusoïde représentant le balancement du travailleur, comme montrée dans la fonction enregistrée lors des essais. En effet, la période d'oscillation subséquente à la chute du travailleur est fonction de nombreux paramètres, notamment de la période fondamentale du système, qui dépend de la flexibilité des ancrages et du câble. Ainsi, il paraît très difficile de proposer une fonction de charge idéalisée avec une partie sinusoïdale, car la période de cette fonction sinusoïdale est dépendante des paramètres du SCAH.

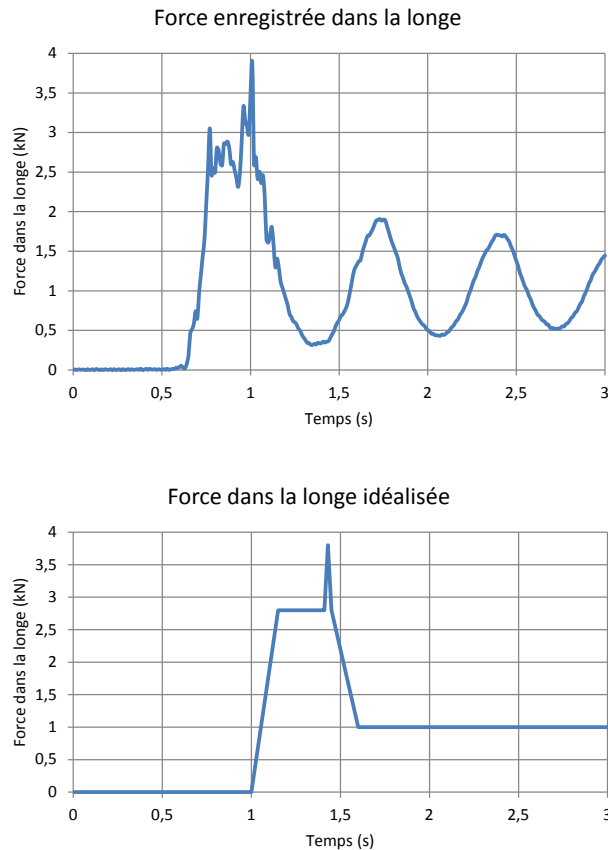


Figure 44 - Fonctions de charge enregistrée et idéalisée.

Quelques sources d'écarts entre la méthode expérimentale et le modèle peuvent être établies :

- Présence des cellules de charge (aux ancrages et au centre du SCAH) non représentées dans le modèle numérique;
- Flèche initiale plus grande à cause du poids de la cellule de charge au centre;
- CAM expérimentale *a priori* plus grande, car la tension initiale est plus importante que celle estimée par le logiciel du fait du poids des cellules de charge;
- Allongement du câble sous l'effet de la tension devrait entraîner une période fondamentale légèrement différente au début et à la fin de l'essai.

Une comparaison des réponses expérimentale et numérique (flèche et CAM) est présentée aux Figures 45 à 48. Y apparaissent aussi les valeurs de flèche et de CAM calculées avec le tableur. Pour la flèche et la CAM finales, deux valeurs sont proposées, soient celles calculées avec la flèche initiale constante, ou flèche initiale augmentée de 5 cm (soit environ ce qui était observé après chaque essai dynamique de chute). Pour les Figures 45 à 48, les fonctions de chargement utilisées sont les mesures de force effectuées dans le cordon d'assujettissement lors des essais réalisés à l'École Polytechnique.

La Figure 45 illustre bien les écarts anticipés et discutés précédemment. Par ailleurs, on note qu'à la fin de l'essai, la flèche expérimentale est plus grande que la flèche estimée avec le modèle numérique. Cela s'explique par le resserrement des torons du câble sous l'effet de la tension lors de l'arrêt de chute. Ce resserrement entraîne une torsion du câble et donc un desserrage du tendeur. Cela se traduit par une flèche « initiale » (sans chargement) après essai qui est plus grande qu'avant l'essai. Cette flèche initiale plus grande va de pair avec une CAM plus faible. À titre d'illustration, les valeurs obtenues avec le tableur pour une flèche initiale de 0,2 m (flèche imposée pour l'essai) et de 0,25 m (flèche augmentée après l'arrêt de chute) sont présentées à la Figure 45. On peut voir que la flèche estimée avec le tableur pour le poids propre du travailleur après la chute est plus proche de la réalité lorsque l'on considère une flèche initiale de 0,25 m. Inversement, on est plus proche de la valeur calculée avec SAP2000 en conservant une flèche initiale de 0,2 m dans le tableur.

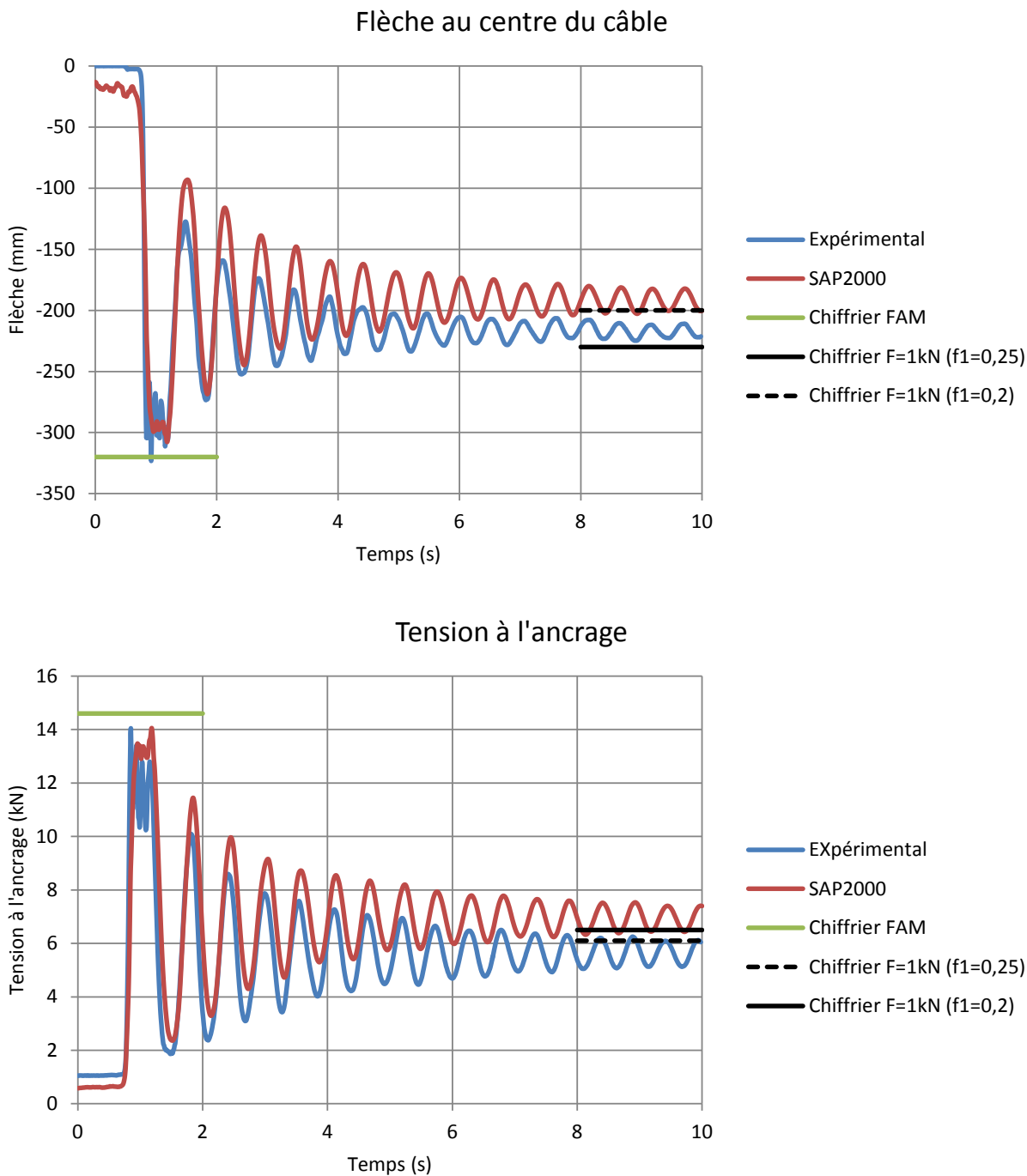


Figure 45 - Comparaison des valeurs expérimentales aux résultats de SAP2000, pour l'essai E-2-10-B.

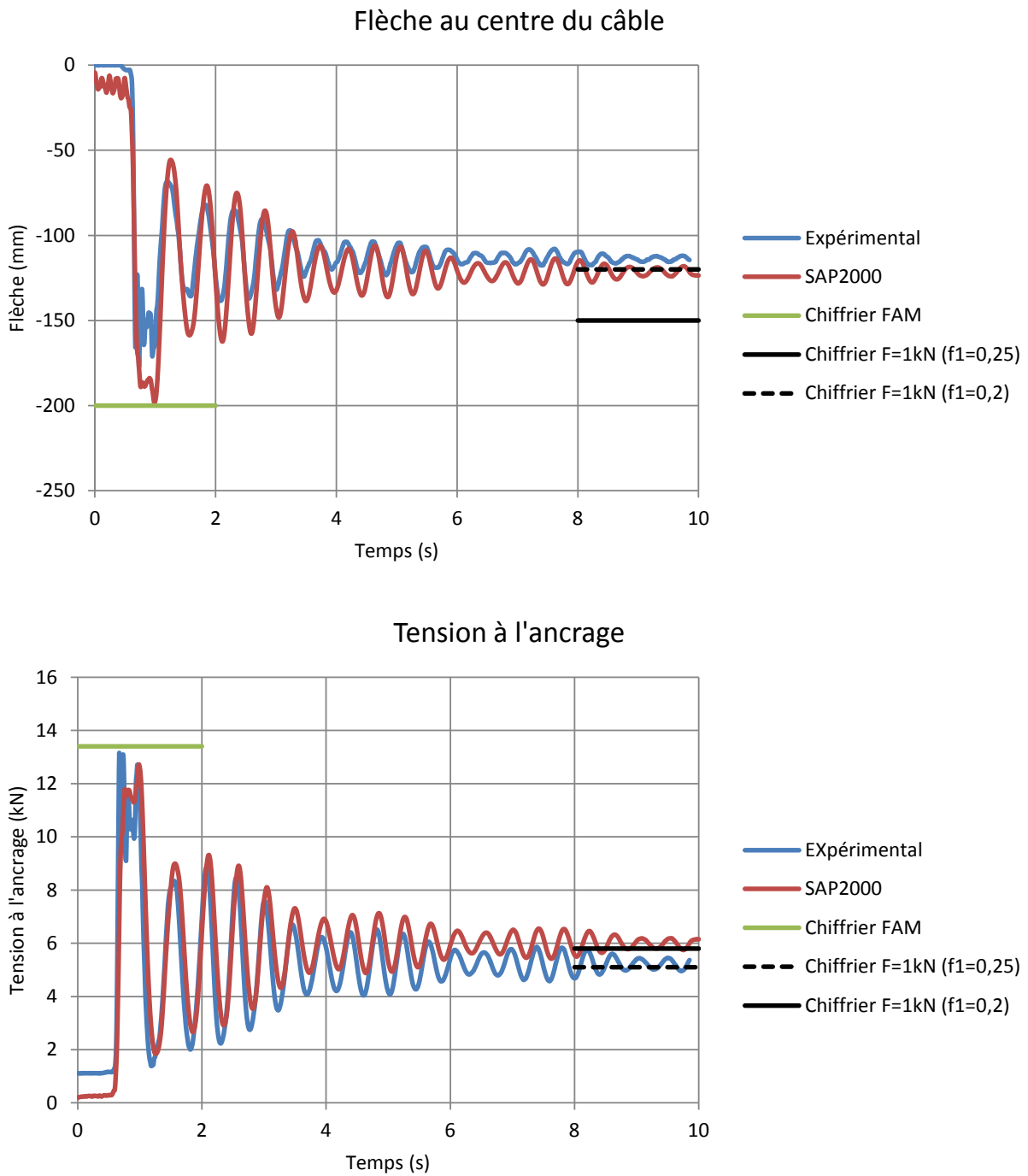


Figure 46 - Comparaison des valeurs expérimentales aux résultats de SAP2000, pour l'essai E-2-5-A.

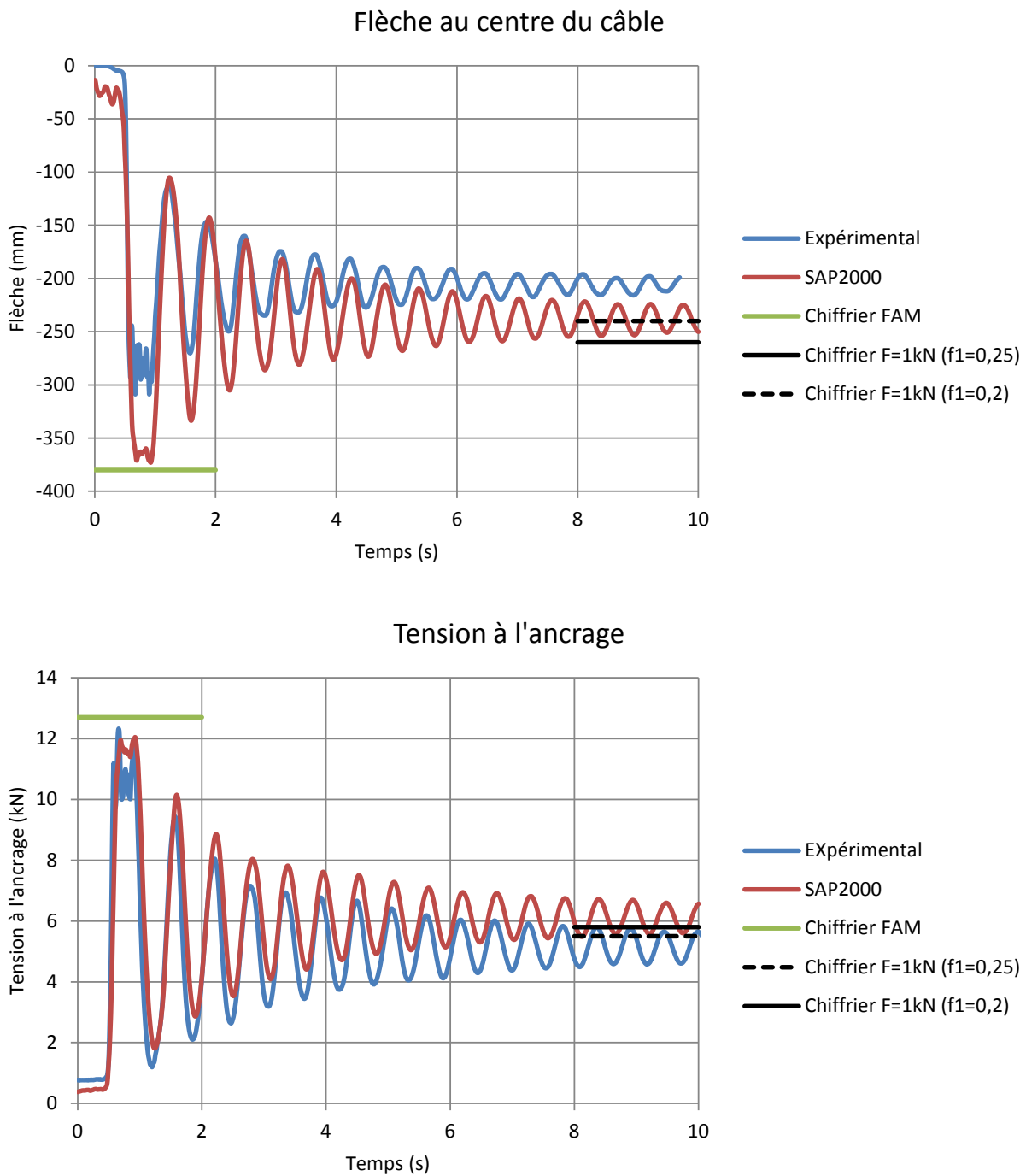


Figure 47 - Comparaison des valeurs expérimentales aux résultats de SAP2000, pour l'essai E-1-10-A.

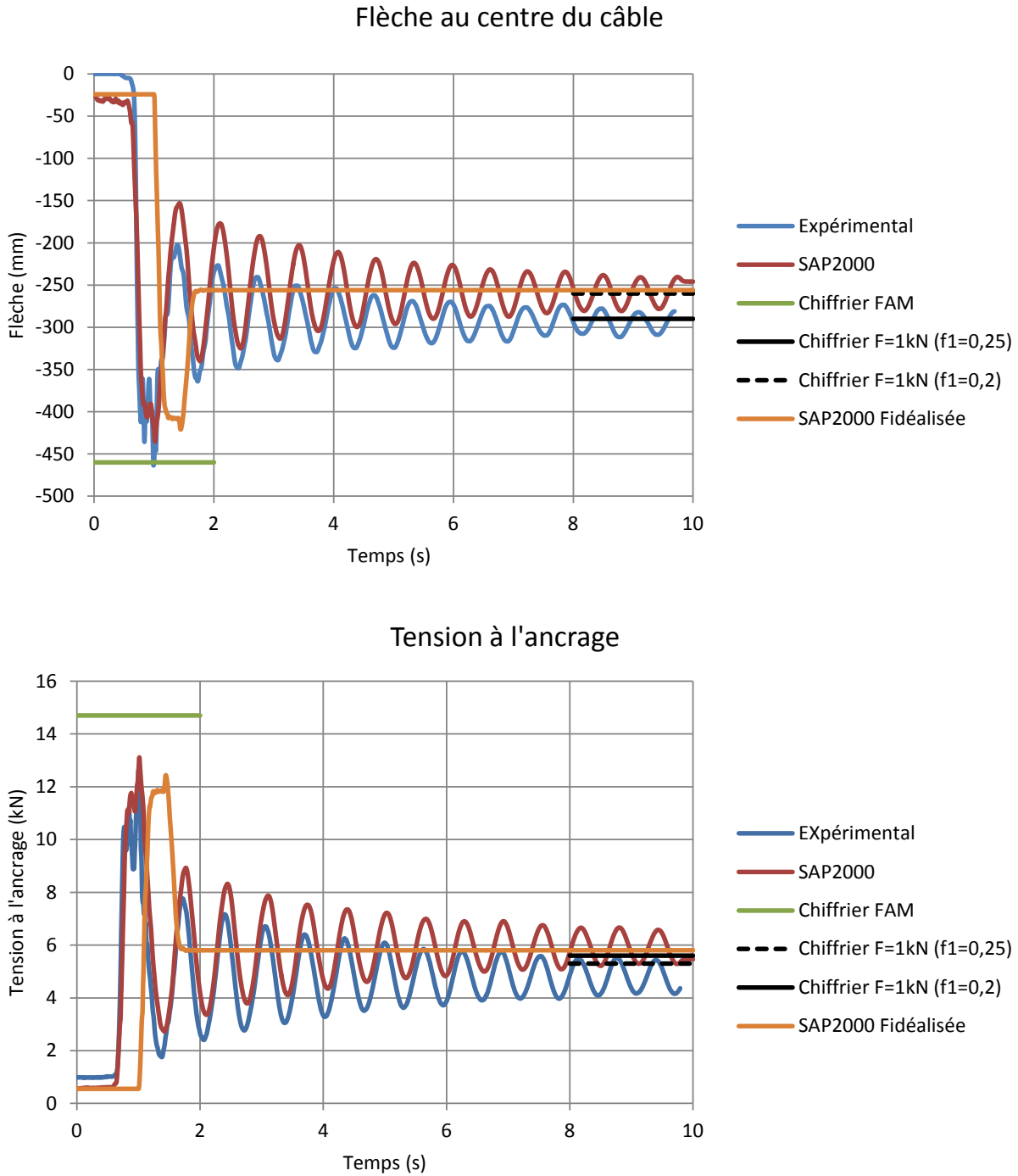


Figure 48 - Comparaison des valeurs expérimentales aux résultats de SAP2000, pour l'essai E-4-10-B.

Les comparaisons présentées aux Figures 45 à 48 montrent que la concordance est bonne entre les mesures expérimentales et les résultats issus du modèle SAP2000. Ceci vient renforcer notre confiance dans le modèle numérique.

À la Figure 48, il y a, en plus, une comparaison avec le résultat donné par SAP2000 pour une force dans le cordon d'assujettissement « idéalisée » (Figure 44). Certes, l'utilisation d'une fonction de chargement idéalisée ne permet pas de simuler toutes les oscillations de la masse lors de l'arrêt de chute. Néanmoins, une telle simulation permet d'estimer les paramètres critiques pour la conception du SCAH : la CAM et la flèche maximales. Cependant, l'intérêt semble limité par rapport à un modèle statique ou même par rapport au tableur, puisque les résultats sont très similaires.

5. TABLEUR DE CALCUL

Dans le cadre de ce projet de recherche, un tableur de calcul contenant des macros VBA (Visual basic for applications) a été développé à l'aide du logiciel Excel. La conception de ce tableur visait plusieurs objectifs :

- Démontrer la faisabilité de l'implantation de la méthode analytique dans un tableur;
- Automatiser les calculs afin de concevoir rapidement les SCAH;
- Faciliter la mise à jour des abaques;
- Diffuser éventuellement l'outil auprès des ingénieurs travaillant en protection contre les chutes de hauteur.

Les chapitres 3 et 4 ont montré la validité de la méthode analytique, et le chapitre 2 a introduit les nouveaux abaques pour la conception des SCAH. Ce chapitre présente le principe de fonctionnement du tableur Excel et les sécurités ayant été mises en place afin d'éviter les erreurs de conception.

L'outil de calcul web accompagnant ce guide technique³ a été réalisé à partir du tableur de calcul Excel développé et présenté ici. Des sécurités similaires à celles présentées ci-dessous sont présentes dans cet outil.

5.1 Principe de fonctionnement

Le principe repose sur la résolution des équations présentées à la section 2. La fonction *goalseek* d'Excel est utilisée pour résoudre l'équation non linéaire.

Outre le calcul de la CAM T et de la flèche maximale f_2 , le tableur permet de tenir compte de la rigidité des ancrages avec les équations proposées à la section 2. Pour cela, l'utilisateur peut choisir des sections HSS courantes (12 sections carrées et 9 sections circulaires), ou un ancrage rigide, ou bien entrer lui-même les paramètres de la section (E , I et le moment résistant M_r). Le tableur calcule automatiquement la rigidité du potelet en fonction de sa hauteur et vérifie que la section choisie peut résister au moment maximum, selon la norme d'acier CSA S16 (avec un coefficient de pondération de 1,5 appliqué sur la CAM).

Un formulaire est utilisé pour l'entrée des données de base nécessaires au calcul du SCAH. L'utilisation d'un formulaire a été privilégiée pour rendre l'outil de calcul plus simple d'approche pour l'utilisateur (tout en permettant l'intégration de fonctions de vérification de qualité avant de fournir les résultats bruts).

5.2 Validation et sécurité du tableur Excel

La résolution de l'équation 8 ne pouvant être faite à la main, le tableur Excel a été développé dès le début de la recherche. Les résultats donnés dans les chapitres précédents et identifiés

³ <http://www.irsst.qc.ca/scah>

« tableur » ont tous été obtenus avec le tableur Excel. Ainsi, la comparaison avec les résultats expérimentaux et numériques a permis de valider la méthode analytique simple présentée au chapitre 2 d'une part, et le tableur Excel, d'autre part.

Comme mentionné précédemment, le tableur Excel comprend un certain nombre de « sécurités » (liste non exhaustive) :

- si des champs du formulaire restent vides, le calcul n'est pas effectué;
- si des champs censés contenir des caractères numériques contiennent des caractères alphabétiques, le calcul n'est pas effectué;
- si l'option « rigide » est choisie pour l'ancrage, il n'est pas possible d'entrer une hauteur de potelet;
- si l'option « rigide » ou un potelet prédéfini est choisi, il n'est pas possible de rentrer des valeurs numériques dans les champs E, I et Mr (potelet utilisateur);
- à chacune des anomalies listées ci-dessus un message d'erreur spécifique est envoyé à l'utilisateur afin de lui indiquer ce qui bloque l'exécution du calcul.

Le contenu du tableur a été transposé dans un outil web. Dans sa forme actuelle, cet outil est donc fonctionnel et relativement sécuritaire. Bien entendu, son utilisation à des fins de conception devrait être réservée à des ingénieurs (un SCAH doit être « conçu et installé selon un plan d'ingénieur »; (CSTC, 2015)) en mesure de porter un jugement critique sur les résultats obtenus. Cet outil peut également servir à faire une vérification rapide d'un SCAH mis en œuvre en chantier, en cas de doute sur la résistance des ancrages flexibles ou sur la hauteur de dégagement.

La méthode de vérification des potelets programmée dans l'outil est conforme à la norme de conception de systèmes actifs de protection contre les chutes (CAN/CSA-Z259.16, 2009) et donc aux exigences du CSTC (CSTC, 2015). En effet, la vérification qui est faite pour le potelet dans l'outil est la suivante :

$$\frac{M_f}{M_r} \leq 1 \quad (32)$$

avec
$$M_f = T \times h_{pot} \times \alpha_A \quad (33)$$

et
$$M_r = \emptyset \times Z \times F_y \quad (34)$$

en considérant $\emptyset = 0,9$ comme défini dans la norme de conception en acier (CAN/CSA-S16, 2013) et $\alpha_A = 1,5$ comme défini dans la norme de conception de systèmes actifs de protection contre les chutes (CAN/CSA-Z259.16, 2009).

6. CONCLUSION

Les chutes de hauteur sont encore aujourd'hui une des causes majeures d'accidents du travail. Souvent les travailleurs ne s'attachent pas, faute de point d'ancrage disponible, ou parce que les points d'attache fixes restreignent trop leurs mouvements. Cette restriction peut être évitée grâce aux SCAH. L'objectif de l'étude était de mettre à jour le guide technique T-18 rédigé en 1991 (Arteau et Lan, 1991), afin de faciliter la conception des cordes d'assurance horizontales, tout en répondant aux exigences normatives et réglementaires actuelles. Le présent rapport de recherche remplace le guide technique T-18 publié en 1991. Plus spécifiquement, les travaux de recherche présentés visaient à :

- 1) proposer une méthode de calcul simple qui tient compte de la rigidité des ancrages;
- 2) effectuer une campagne d'essais dynamiques de chute et de simulations numériques pour valider la méthode de calcul;
- 3) développer de nouveaux abaques de calcul découlant de cette méthode.

La campagne d'essais dynamiques de chute comprend 42 essais au cours desquels l'influence de plusieurs paramètres a été étudiée : portée, flexibilité des ancrages, diamètre du câble, flèche initiale. On observe expérimentalement que plus la rigidité de l'ancrage augmente, plus la CAM est grande. On remarque également que plus l'ancrage est flexible, plus la flèche est grande. Ces tendances étaient anticipées et sont mises de l'avant par le modèle analytique simple. Les résultats expérimentaux se comparent bien avec la méthode analytique simple implantée dans le tableur : l'écart est compris entre -17 et +10 % pour la CAM. Celle-ci n'est sous-estimée que dans un seul cas, et surestimée dans tous les autres : la méthode implantée dans le tableur est donc conservatrice. La flèche est plutôt bien estimée dans la majorité des cas : dans cinq essais la surestimation est de 2 cm, et la flèche est sous-estimée pour tous les autres cas (avec un maximum de 13 cm de sous-estimation). Cet écart est de l'ordre de grandeur des incertitudes sur la taille du travailleur (ou l'étirement du harnais), et une surestimation de la flèche va dans le sens de la sécurité. En considérant une FAM de 4 kN et non les valeurs mesurées lors des essais, les CAM sont systématiquement surestimées, et les flèches également (à l'exception d'un cas, où la flèche est sous-estimée de 2 cm). La méthode analytique proposée est donc conservatrice et peut être utilisée pour la conception d'un SCAH.

Des simulations numériques ont été réalisées pour reproduire les essais faits en laboratoire. L'écart entre les simulations numériques statiques non linéaires et le modèle analytique simple est de 0,3 % pour la CAM et de 1,4 % pour la flèche. La méthode analytique simple intégrée au tableur est donc très efficace et le passage à un modèle numérique statique n'apporte pas d'avantage significatif. Les résultats du tableur ont aussi été comparés pour des essais non réalisés en laboratoire : absorbeur d'énergie gelé, CAH à travées multiples. Le modèle analytique simple donne des résultats tout à fait acceptables pour les câbles à travées multiples (écart moyen de la CAM de -1,4 %, écart moyen pour la flèche de -3,5 %); il s'agit d'un ajout intéressant par rapport au guide T-18 de 1991. Enfin, des simulations dynamiques temporelles en intégration directe ont été faites en utilisant une fonction de chargement directement enregistrée au laboratoire. Le modèle numérique reproduit fidèlement la CAM et la flèche observées *in situ*. Une fonction de chargement idéalisée a également été utilisée aux fins de comparaison avec les

résultats obtenus avec la fonction enregistrée. L'intérêt d'une simulation dynamique temporelle est relativement limité comparativement à une analyse statique.

Enfin, le rapport a montré qu'il est possible d'implanter la méthode de calcul analytique dans un tableur Excel et d'y incorporer des sécurités afin d'éviter toute erreur de manipulation. Le tableur est également équipé d'une fonction de validation des ancrages flexibles qui correspond à la méthode de conception imposée par le CSTC. Comme mentionné précédemment, le tableur a été converti en un outil web qui est plutôt convivial et qui permet à un utilisateur de déterminer la flèche, la CAM et les potelets d'ancrage d'un SCAH en une minute environ, ce qui est nettement plus rapide que l'utilisation d'un logiciel de structure avancé.

La méthode analytique simple proposée dans ce rapport a été validée par des essais en laboratoire et par des simulations numériques. Cette méthode statique et linéaire s'appuie sur plusieurs hypothèses simplificatrices afin de la rendre la plus facile d'utilisation possible et fournit une borne supérieure des résultats. Elle peut être utilisée pour le dimensionnement des câbles métalliques à une seule travée ou à travées multiples et ne devrait pas être utilisée pour les câbles synthétiques. Les écarts observés avec les essais *in situ* indiquent que l'on peut l'utiliser pour la conception des SCAH métalliques sans risque puisqu'elle est conservatrice. Pour autant, par rapport à la méthode de 1991, elle présente l'avantage de prendre en compte la flexibilité des ancrages et ainsi de ne pas trop surdimensionner les potelets. Cette méthode de conception nous paraît être un compromis intéressant entre simplicité et précision.

BIBLIOGRAPHIE

- Alaurent, R., J. Arteau, P.C. Wing, J-F. Corbeil, L. Desbois, D. Fortin et A. Lan. 1992. *Conception De Câbles De Secours Horizontaux* (1992). Notes de cours, École Polytechnique de Montréal.
- Arteau, J. et A. Lan. 1991. *Guide Technique - Conception Des Câbles De Secours Horizontaux*. Coll. « Études et Recherches / Guide Technique », Rapport T-18. IRSST.
- Branchtein, M.C. 2013. *Lifeline Design : Calculation of the Tensions*. Proceedings of the 2013 International Society for Fall Protection Symposium, June 27-28th, Las Vegas.
- Broughton, P. et P. Ndumbaro. 1994. *Analysis of Cables & Catenary Structures* (1994). Thomas Telford.
- CAN/CSA-S16. 2013. *Règles De Calcul Des Charpentes En Acier*. Association Canadienne de Normalisation.
- CAN/CSA-Z259.2.2. 2004. *Dispositifs À Cordon Autorétractable Pour Dispositifs Antichutes*. Association Canadienne de Normalisation.
- CAN/CSA-Z259.10. 2012. *Harnais De Sécurité*. Association Canadienne de Normalisation.
- CAN/CSA-Z259.11. 2005. *Energy Absorbers and Lanyards*. Association Canadienne de Normalisation.
- CAN/CSA-Z259.12. 2011. *Accessoires De Raccordement Pour Les Systèmes Personnels De Protection Contre Les Chutes (Sppcc)*. Association Canadienne de Normalisation.
- CAN/CSA-Z259.13. 2009. *Flexible Horizontal Lifeline Systems*. Association Canadienne de Normalisation.
- CAN/CSA-Z259.16. 2009. *Conception De Systèmes Actifs De Protection Contre Les Chutes*. Association Canadienne de Normalisation.
- Chopra, A. K. 2007. *Dynamics of Structures : Theory and Applications to Earthquake Engineering*, 3rd. Coll. « Prentice-Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics. ». Upper Saddle River, N. J.: Pearson/Prentice-Hall, 876 p.
- CSI, Computers and Structures. 2014. *Csi Analysis Reference Manual*.
- CSTC. 2001. *Code De Sécurité Pour Les Travaux De Construction - S-2.1, R.4*. Éditeur officiel du Québec.

- CSTC. 2015. *Code De Sécurité Pour Les Travaux De Construction - S-2.1, R.4*. Éditeur officiel du Québec.
- CTICM. 1975. « Câble De Sécurité Du Personnel De Montage Équipé De Ceintures Avec Amortisseurs De Chute ». Supplément à la revue construction métallique n°1 mars 1975.
- CTICM. 1977. « Câble De Sécurité Du Personnel De Montage Muni D'équipement Individuel Avec Amortisseur De Chute ». Supplément à la revue construction métallique n°3 mars 1977.
- Dayawansa, P.H., C.C. Goh et R. Wilkie. 1989. *Analysis and Testing of a Static Line System*. Rapport MRL/CN8/89/001, The Broken Hill Proprietary Company Limited.
- Duguay, P., A. Boucher, M-A. Busque, P. Prud'homme et D. Vergara. 2012. *Lésions Professionnelles Indemnisées Au Québec En 2005-2007 - Profil Statistique Par Industrie - Catégorie Professionnelle*. Coll. « Études et Recherches », Rapport R-749, IRSST.
- Duguay, P., F. Hébert et P. Massicotte. 2003. *Identification De Professions Cibles Pour Le Québec À Partir D'indicateurs De Lésions Professionnelles Indemnisées*. Dans « Cultures préventives : des attitudes aux habitudes. » 25e Congrès de l'Association québécoise pour l'hygiène, la santé et la sécurité du travail, 7-9 mai, Trois-Rivières, Canada, p. 280-289
- Dupont, L. 2010. « Les Câbles De Secours Horizontaux : Une "Ligne De Vie" À L'horizontale ». Prévention au travail, Printemps 2010.
- Huu-Thai, T. et K. Seung-Eock. 2011. « Nonlinear Static and Dynamic Analysis of Cable Structures ». Finite elements in analysis and design, vol. 47, n°3, p. 237-246.
- IHSA. 2009. *Hoisting and Rigging Safety Manual*. Infrastructure Health & Safety Association of Ontario.
- Lebeau, M., P. Duguay et A. Boucher. 2013. *Les Coûts Des Lésions Professionnelles Au Québec, 2005-2007*. Coll. « Études et Recherches », Rapport R-769, IRSST.
- Leclerc, M. et R. Tremblay. 2015. *Essais De Chute Pour La Mise À Jour Du Guide Technique De Conception Des Systèmes De Cordes D'assurance Horizontale (Scah)*. Rapport. École Polytechnique de Montréal.
- OPPBTP. 2012. *Spécial Travaux En Hauteur : Toiture, Façade, Plancher... Les Solutions Pour Empêcher Les Chutes*. Prévention BTP, n° 159, Décembre 2012.
- OSHA. 1998. *Osha 1926 - Safety and Health Regulations for Construction - Subpart M - Fall Protection for the Construction Industry*. Occupational Safety & Health Administration.

Paureau, J. et M. Jacqmin. 1998. *Lignes De Vie. Spécifications. Essais*. Coll. « Cahiers de notes documentaire - Hygiène et sécurité du travail ».

Sabourin, G. 2011. *Faire Tomber Les Risques De Chutes De Hauteur*. Prévention au travail, printemps 2011.

Sulowski, A.C. et N. Miura. 1983. *Horizontal Lifelines*. Rapport No 83-294-H, Ontario hydro research division.