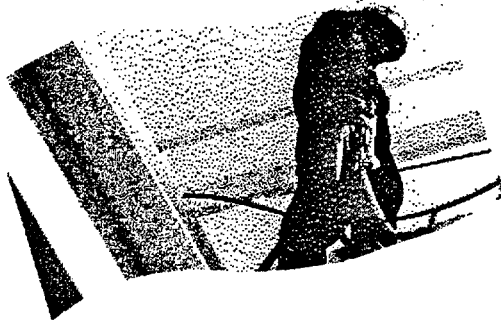


Protection contre les chutes
de hauteur -
Conception de câbles
de secours horizontaux

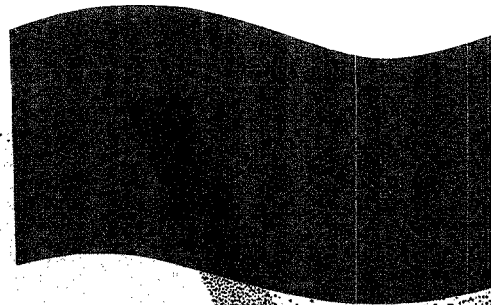


ÉTUDES ET RECHERCHES

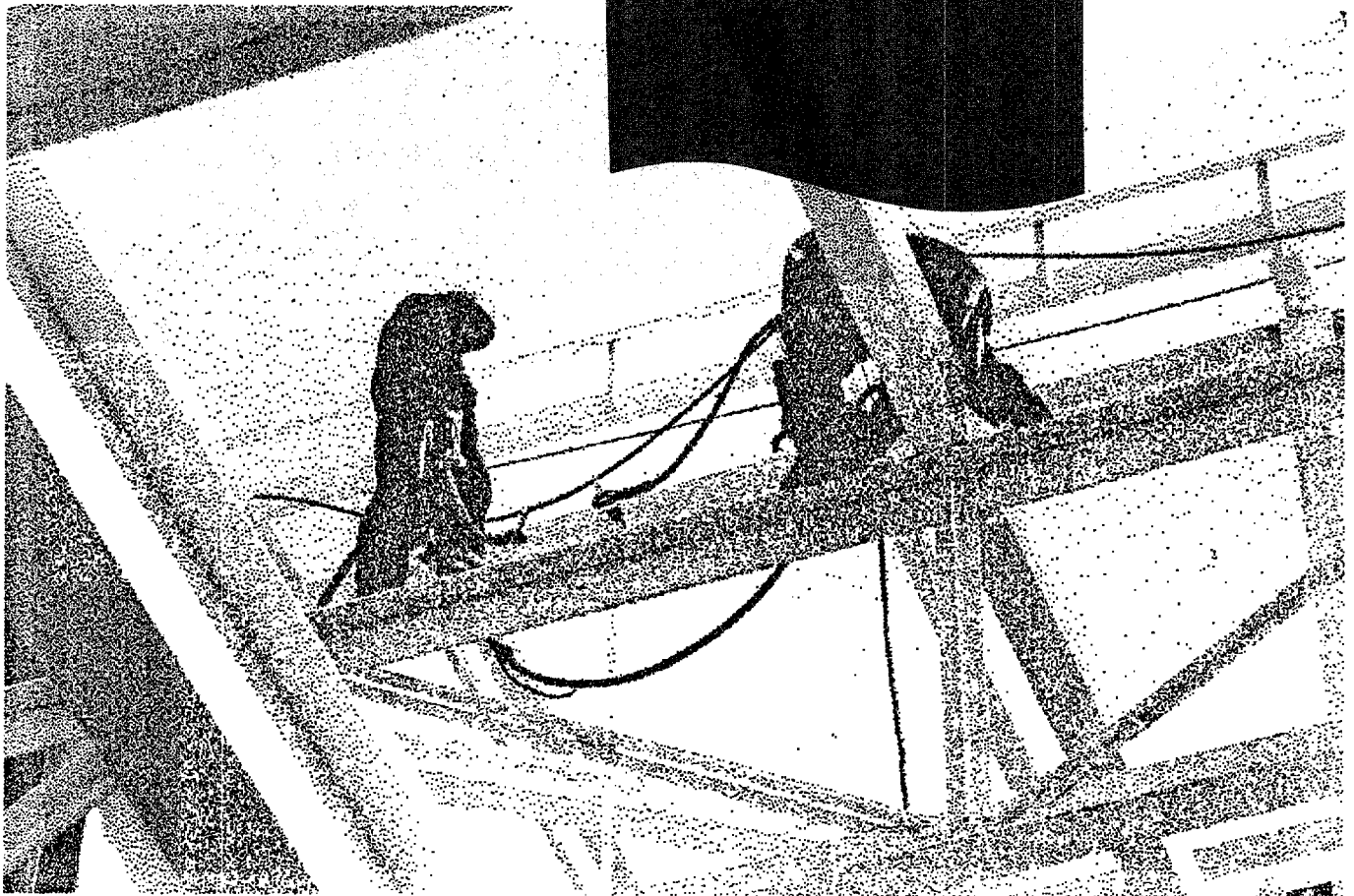
Jean Arteau

André Lan

Septembre 1991 T-18



GUIDE TECHNIQUE



IRSST
Institut de recherche
en santé et en sécurité
du travail du Québec

La recherche, pour mieux comprendre

L'Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec (IRSST) est un organisme de recherche scientifique voué à l'identification et à l'élimination à la source des dangers professionnels, et à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes. Financé par la CSST, l'Institut réalise et finance, par subvention ou contrats, des recherches qui visent à réduire les coûts humains et financiers occasionnés par les accidents de travail et les maladies professionnelles.

Pour tout connaître de l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par la CSST et l'Institut.

Les résultats des travaux de l'Institut sont présentés dans une série de publications, disponibles sur demande à la Direction des communications.

Il est possible de se procurer le catalogue des publications de l'Institut et de s'abonner à *Prévention au travail* en écrivant à l'adresse au bas de cette page.

ATTENTION

Cette version numérique vous est offerte à titre d'information seulement. Bien que tout ait été mis en œuvre pour préserver la qualité des documents lors du transfert numérique, il se peut que certains caractères aient été omis, altérés ou effacés. Les données contenues dans les tableaux et graphiques doivent être vérifiées à l'aide de la version papier avant utilisation.

Dépôt légal
Bibliothèque nationale du Québec

IRSST - Direction des communications
505, boul. de Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : (514) 288-1 551
Télécopieur: (514) 288-7636
Site internet : www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche en santé
et en sécurité du travail du Québec,

Protection contre les chutes
de hauteur -
Conception de câbles
de secours horizontaux

Jean Arteau
Programme sécurité-ingénierie, IRSST

André Lan
Programme sécurité-ergonomie, IRSST

ÉTUDES ET
RECHERCHES

GUIDE TECHNIQUE

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs.

© Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec, septembre 1991.
3^e trimestre 1991.

TABLE DES MATIERES

| | PAGE |
|---|------|
| 1. Introduction | 1 |
| 2. Arrêt d'une chute avec un lien de retenue | 2 |
| 2.1 Influence de la masse m , du diamètre d , de la longueur L , de la hauteur de chute H , et du module d'élasticité E du lien de retenue sur la force maximale d'arrêt F_{\max} | 5 |
| 2.2 Absorbeur d'énergie | 8 |
| 2.3 Résumé - Lien de retenue | 12 |
| 2.4 Choix d'un lien de retenue | 13 |
| 3. Conception d'un système de câble de secours horizontal | 14 |
| 3.1 Câble horizontal | 15 |
| 3.2 Câble de secours horizontal - Analyse simplifiée | 16 |
| 3.3 Construction des abaques de la force maximale d'arrêt et de la force maximale d'ancrage à partir des formules de la statique obtenues à partir de l'analyse parabolique développées en annexe D | 18 |
| 4. Analyse théorique et essais expérimentaux d'Ontario Hydro | 37 |
| 4.1 Résumé - Essais expérimentaux et discussion | 37 |
| 4.2 Conclusions et recommandations des essais d'Ontario Hydro | 39 |
| 4.3 Résultats expérimentaux d'Ontario Hydro et analyse simplifiée | 40 |
| 4.4 Conception graphique simplifiée de systèmes de câble secours horizontal - lien de retenue à partir des abaques d'Ontario Hydro | 40 |
| 5. Ancrages de câbles de secours horizontaux | 41 |
| 5.1. Types d'ancrages rencontrés sur les chantiers | 41 |

TABLE DES MATIERES

| | <u>PAGE</u> |
|--|-------------|
| 5.2. Principe de calcul | 43 |
| 6. Explication de l'alinéa (d) du code de sécurité pour les travaux de construction du Québec | 57 |
| 7. Conclusion et exemples | 60 |
| Liste des figures | |
| Remerciements | |
| Annexes | |
| Bibliographie | |

LISTE DES FIGURES

| | <u>Page</u> | |
|----------|--|----|
| Figure 1 | Modèle simplifié de l'arrêt d'une chute avec un lien de retenue conventionnel | 3 |
| Figure 2 | Absorbeur d'énergie à déchirures | 9 |
| Figure 3 | Types d'absorbeurs d'énergie | 10 |
| Figure 4 | Résultats d'essais types | 11 |
| Figure 5 | Câble horizontal | 15 |
| Figure 6 | Définition des termes utilisés dans les abaques | 21 |
| Figure 7 | Installation du câble au chantier | 45 |
| Figure 8 | Ancrage du câble sur la semelle supérieure d'une poutre de la structure | 46 |

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'ensemble des personnes qui ont rendu possible la rédaction de ce manuel. Nos remerciements les plus cordiaux vont à M. Philip Chung Wing, ingénieur, Acier Marshall Limitée et à M. Raymond Béchard, ingénieur, Dominion Bridge Québec, qui ont bienveillamment lu le manuel et qui, par leurs commentaires pertinents, nous ont grandement aidé dans ce travail.

1. INTRODUCTION

Ce manuel est rédigé pour le personnel technique des entreprises qui ont à concevoir des systèmes de protection contre les chutes composés d'un câble de secours horizontal. Il décrit les principes de conception et permet de comprendre l'importance des forces en jeu. Les forces appliquées par le câble de secours horizontal sur les ancrages sont très élevées. Conséquemment, la démarche de conception, les plans de fabrication et d'installation et le mode opératoire doivent être réalisés par un personnel technique expérimenté. Le tout devra être **SUPERVISÉ ET APPROUVÉ PAR UN INGÉNIEUR**. Les alinéas 2.10.12.3.d (i) à (iv) du Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec - décrivent les exigences minimales d'un système de câbles de secours horizontaux dont la conception ne requiert pas la supervision et l'approbation de l'ingénieur.

Ce manuel technique sur la conception des câbles de secours horizontaux comprend six parties :

la première explique une façon simplifiée d'analyser le problème;

la deuxième est une description d'un absorbeur d'énergie pour un câble de secours horizontal, "latchway" et rail;

la troisième est l'alinéa 2.10.2.3 du code de sécurité pour les travaux de construction, adopté par le comité de révision apparu dans la gazette officielle du Québec qui porte sur les câbles de secours horizontaux;

la quatrième est l'ensemble des abaques développés suivant l'analyse parabolique et les alinéas 2.10.2.3.d (i) à (iv) qui permettent de concevoir et de vérifier les systèmes de câbles de secours horizontaux;

la cinquième est l'ensemble des conclusions des résultats d'essais réalisés par Ontario Hydro à partir desquels des abaques permettant de concevoir de façon graphique les systèmes de câbles de secours horizontaux ont été développés. Le lecteur intéressé peut consulter ces abaques dans le rapport A.C Sulowski et al (Rapport 83-294-H Ontario Hydro);

la sixième est l'annexe où l'ensemble des études théoriques sont explicitées en détail et la synthèse des principaux résultats d'essais réalisés par Ontario Hydro sur différentes combinaisons de câbles horizontaux; elle présente les données empiriques qui corroborent les analyses détaillées qui pourraient être faites par des ingénieurs.

2

2. ARRÊT D'UNE CHUTE AVEC UN LIEN DE RETENUE

Pour comprendre le problème des câbles de secours horizontaux, il faut décomposer le problème en deux : soit l'arrêt de chute par un système individuel d'arrêt de chute et l'effet d'une force verticale appliquée au centre d'un câble de secours horizontal. Voyons l'arrêt d'une chute par un lien de retenue à point d'ancrage fixe.

Soit une masse m , fixée à un point d'ancrage fixe par un lien de retenue de longueur L , située à une hauteur de chute H (figure 1). Suite à la chute de la masse, l'arrêt transforme l'énergie potentielle de la masse m en énergie de déformation dans le lien de retenue. L'énergie potentielle U_p de la chute $mg(H + AH)$ doit être égale à l'énergie de déformation du lien de retenue.

Avant la chute de la masse m , la tension dans le lien de retenue est zéro. Dès la mise en tension du lien de retenue, la force dans le lien croît de zéro jusqu'à la force maximale d'arrêt F_{\max} . Le travail ou l'énergie de déformation est l'intégrale $\int F(x)dx$, ou de façon simplifiée, l'aire hachurée sous la courbe F en fonction du déplacement. Comme on est dans le domaine élastique, on suppose que F croît linéairement de zéro à F_{\max} durant l'allongement AH du lien de retenue.

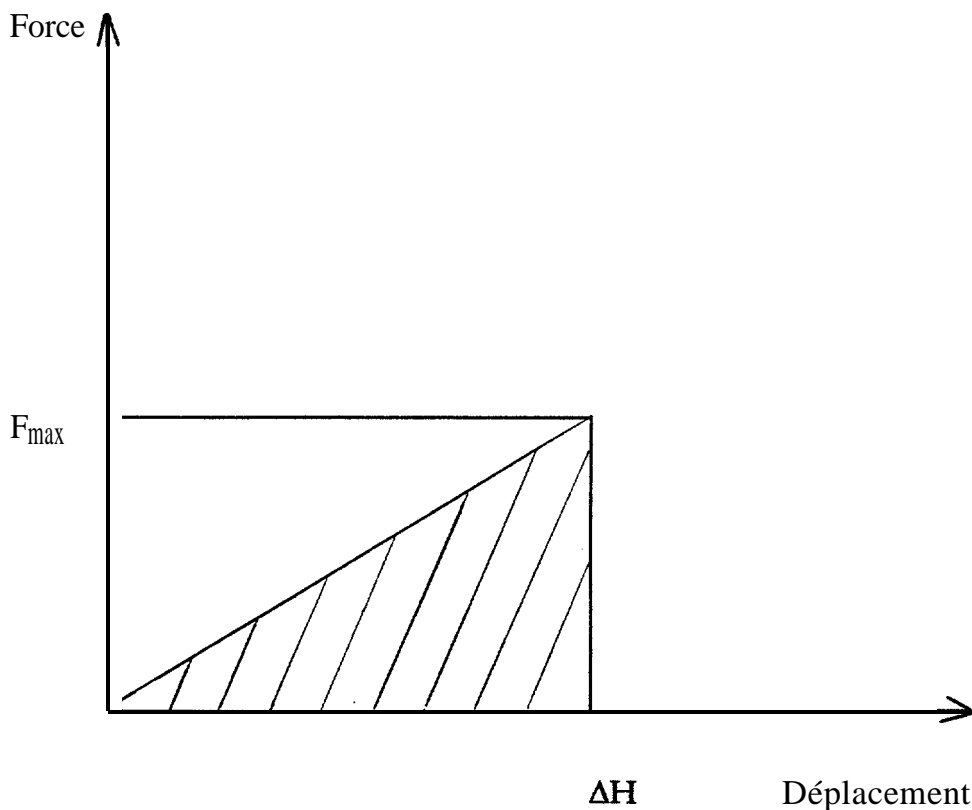
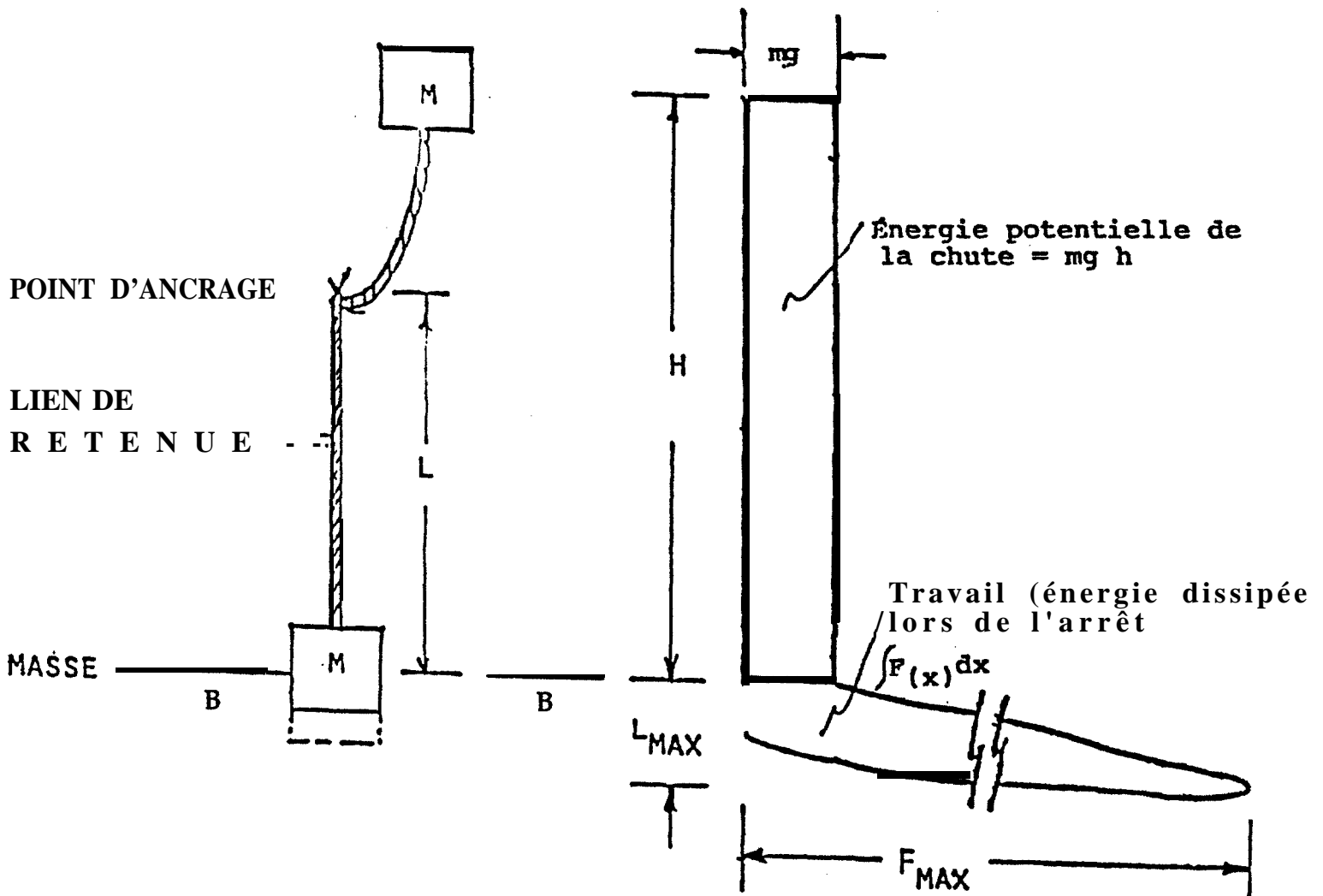


Figure 1 : Modèle simplifié de l'arrêt d'une chute avec un lien de retenue conventionnel



$$F_{\max} = mg \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2E\lambda}{L} \left(\frac{H}{L} \right)} \right]$$

m = masse

g = accélération (gravité) = 9.81 m/sec^2

$K = AE =$ constante du lien de retenue

L

H = Hauteur de chute

E = module d'élasticité du lien de retenue

A = Aire de la section droite du lien de retenue

L = Longueur du lien de retenue

Les formules suivantes

$$F_{\max} = mg \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2EA}{mgL} H} \right] \quad (1)$$

ou avec $K = \frac{AE}{L}$

$$F_{\max} = mg \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2KH}{mg}} \right] \quad (2)$$

développées à l'annexe A permettent de calculer la force maximale d'arrêt, avec:

- m : masse, Kg
- g : accélération de la gravité, 9.81 m/sec²
- A : aire de la section du lien de retenue, mm²
- E : module d'élasticité du lien de retenue, N/mm²
- L : longueur du lien de retenue, m
- K : $\frac{AE}{L}$, constante de rigidité du lien, N/m

Comme l'illustre la formule (1), la force d'arrêt maximale F_{\max} générée dans le lien de retenue dépend des paramètres suivants :

- la masse m qui chute
- du diamètre d du lien de retenue
- de la longueur L du lien de retenue
- de la hauteur de chute H de la masse m
- de la caractéristique mécanique E du lien de retenue.

2.1. INFLUENCE DE LA MASSE m , DU DIAMÈTRE d , DE LA LONGUEUR L , DE LA HAUTEUR DE CHUTE H , ET DU MODULE D'ELASTICITE E DU LIEN DE RETENUE SUR LA FORCE MAXIMALE D'ARRET F_{\max}

Pour étudier l'influence de chaque paramètre mentionné ci-dessus sur la force d'arrêt maximale F_{\max} on étudiera successivement la variation de F_{\max} d'un lien de retenue en fonction d'un paramètre en gardant les autres paramètres constants à l'aide de la formule (1)

$$F_{\max} = mg \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2 EA}{mg} \frac{H}{L}} \right] \quad (1)$$

Pour illustrer l'étude, on considère un lien de retenue suivant:

Câble de nylon

| | | |
|-------------------------|---|---------------------|
| Diamètre d | = | 16 mm |
| Aire A | = | 201 mm ² |
| Longueur L | = | 1.5 m |
| Hauteur de chute H | = | 1.5 m |
| Module d'élasticité E | = | 240 MPa |
| Masse m | = | 100 kg |

2.1.1 Influence de la masse m

Le tableau suivant résume l'influence de la masse m sur la force maximale d'arrêt F_{\max}

| m (kg) | H / L | F_{\max} (kN) |
|----------|---------|-----------------|
| 80 | 1 | 9.52 |
| 90 | 1 | 10.16 |
| 100 | 1 | 10.76 |
| 110 | 1 | 11.34 |

On constate que F_{\max} croît lorsque la masse m croît. Par exemple, un accroissement de 0.0981 kN (10 kg) de la masse engendre un accroissement d'environ 0.64 kN de F_{\max} pour ce type de lien de retenue.

2.1.2. Influence du diamètre d du lien de retenue

Le tableau suivant résume la variation de F_{\max} en fonction du diamètre d'un lien de retenue de longueur $L = 1.5$ m, $E = 240$ N/mm² pour une hauteur de chute de 1.5 m et une masse de chute de 0.981 kN (100 kg).

| d (mm) | d (pouce) | H / L | F _{max} (kN) |
|--------|-----------|-------|-----------------------|
| 9.53 | 3 / 8 | 1 | 6.86 |
| 12.70 | 1 / 2 | 1 | 8.77 |
| 16 | 5 / 8 | 1 | 10.76 |

On constate que F_{\max} croît lorsque le diamètre du lien de retenue augmente.

2.1.3. Influence de la longueur du lien de retenue L

Le tableau suivant résume la variation de F_{\max} en fonction de la longueur du lien de retenue d'un câble de 16 mm de diamètre, de module d'élasticité $E = 240$ N/mm² pour une hauteur de chute de 1.5 m et une masse de chute de 100 Kg.

| L (m) | H / L | F _{max} (kN) |
|-------|-------------|-----------------------|
| 1.5 | 1 | 10.76 |
| 2 | 0.75 | 9.47 |
| 2.5 | 0.60 | 8.58 |

On constate que F_{\max} décroît lorsque la longueur L du lien augmente. Cependant L doit être choisie afin d'éviter que le travailleur heurte un objet **sous-jacent** ou le plancher inférieur.

2.1.4. Influence de la hauteur de chute H

La hauteur de chute H n'est pas une caractéristique du lien de retenue; elle dépend plutôt du lieu où se trouve la masse au point de chute et par conséquent $H \leq 2L$. On note que l'étude peut être faite en considérant le paramètre de facteur de chute (H/L). Le tableau suivant résume la variation de F_{\max} en fonction de la hauteur de chute H d'un câble de 16 mm de diamètre, de longueur $L = 1.5$ m, $E = 240$ N/mm² et une masse de chute de 100 Kg.

| H (m) | H/L | F_{\max} (kN) |
|------------|----------|-----------------|
| 1 | 0.67 | 8.99 |
| 1.2 | 0.80 | 9.74 |
| 1.5 | 1 | 10.76 |
| 2 | 1.33 | 12.26 |

On constate que F_{\max} croît lorsque la hauteur de chute croît.

2.1.5. Influence du module d'élasticité E

Le tableau suivant résume les différentes valeurs de F_{\max} en fonction du module d'élasticité pour un lien de retenue de 16 mm de diamètre, de longueur $L = 1.5$ m, d'une hauteur de chute de 1.5 m et d'une masse de chute de 100 Kg.

| E (MPa) | Matériaux | H / L | F_{\max} (kN) |
|---------|-----------|-------|-----------------|
| 240 | Nylon | 1 | 10.76 |
| 800 | Sangle | 1 | 18.77 |
| 58000 | | 1 | 152.25 |
| 200000 | Acier | 1 | 281.87 |

On constate que F_{\max} décroît lorsque le module d'élasticité décroît. Comme on cherche à minimiser la force maximale d'arrêt, on utilisera de préférence un lien de retenue en nylon. Si toutefois un lien de retenue en acier est utilisé, il faut prévoir un absorbeur d'énergie.

2.2. ABSORBEUR D'ENERGIE

2.2.1. Définition

Un absorbeur d'énergie est un dispositif qui dissipe une quantité substantielle d'énergie et limite les forces de décélération que le système impose sur le corps humain lors de l'arrêt de la chute.

2.2.2. Principes

Pour réaliser la dissipation de l'énergie, les absorbeurs d'énergie peuvent utiliser divers mécanismes tels que la déformation, la friction, la déchirure du matériel ou le bris des points de couture. Un absorbeur d'énergie produit un accroissement de la distance de décélération; il peut être porté par le travailleur ou faire partie d'un sous-système de câble de secours horizontal ou d'un sous-système de câble de secours vertical (voir Fig. 2).

2.2.3. Exemples d'absorbeurs d'énergie

- (a) Lien de retenue simple (simple rope lanyard, voir Fig. 3a). La corde à nylon trois brins (quelques fois le polyester) est un absorbeur d'énergie du à son extensibilité.
- (b) Sangle (tear ply webbing, voir Fig. 3b). La sangle est constituée de deux couches de nylon ou polyester tissées ou cousues ensemble de sorte qu'une force de traction sur la sangle engendre la rupture des coutures et par conséquent la dissipation d'énergie.
- (c) Crochet à travers la sangle (hook-through-webbing, voir Fig. 3c). Dans ce type d'absorbeur d'énergie, la rupture de la trame absorbe de l'énergie.
- (d) Lien à travers un étranglement (rope-through-constriction, voir Fig. 3d). Dans ce type d'absorbeur d'énergie, la corde en nylon ou polyester est tirée à travers ou sur un étranglement mécanique.
- (e) Bande métallique plissée (corrugated-metal-strip, voir Fig. 3e). La déformation ou l'étirement de la bande absorbe de l'énergie.

Figure 2

ABSORBEUR D'ENERGIE A DECHIRURE

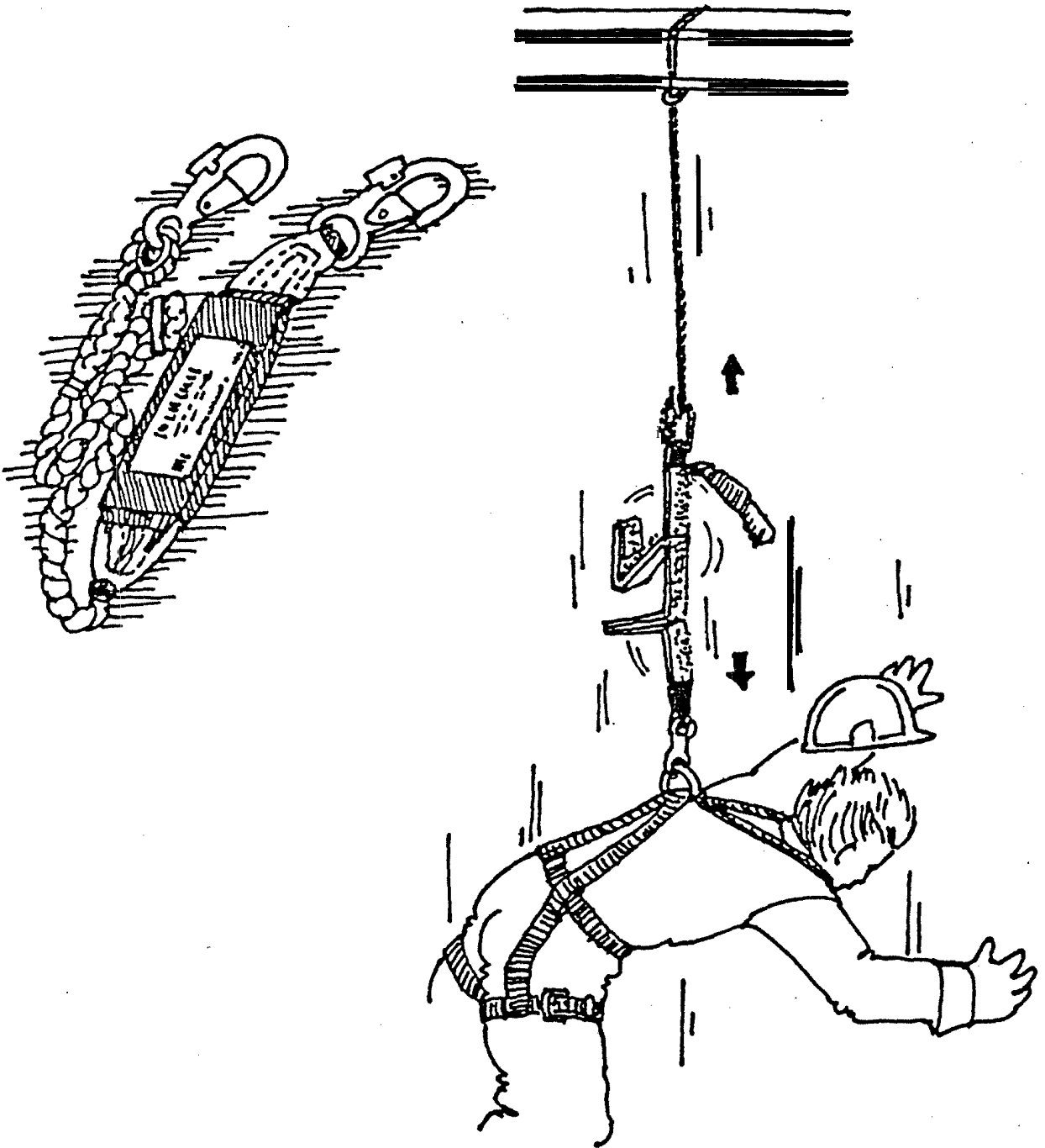


Figure 3

TYPES D'ABSORBEURS D'ENERGIE

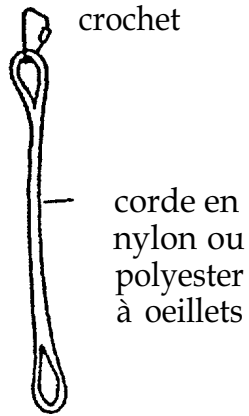


Fig 3a Lien de retenue simple

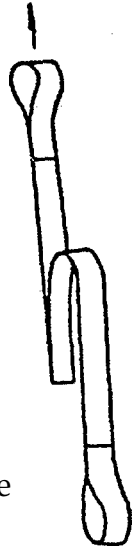


Fig 3b Sangle



Fig 3c Crochet à travers la sangle

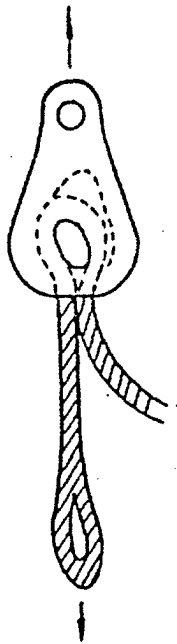


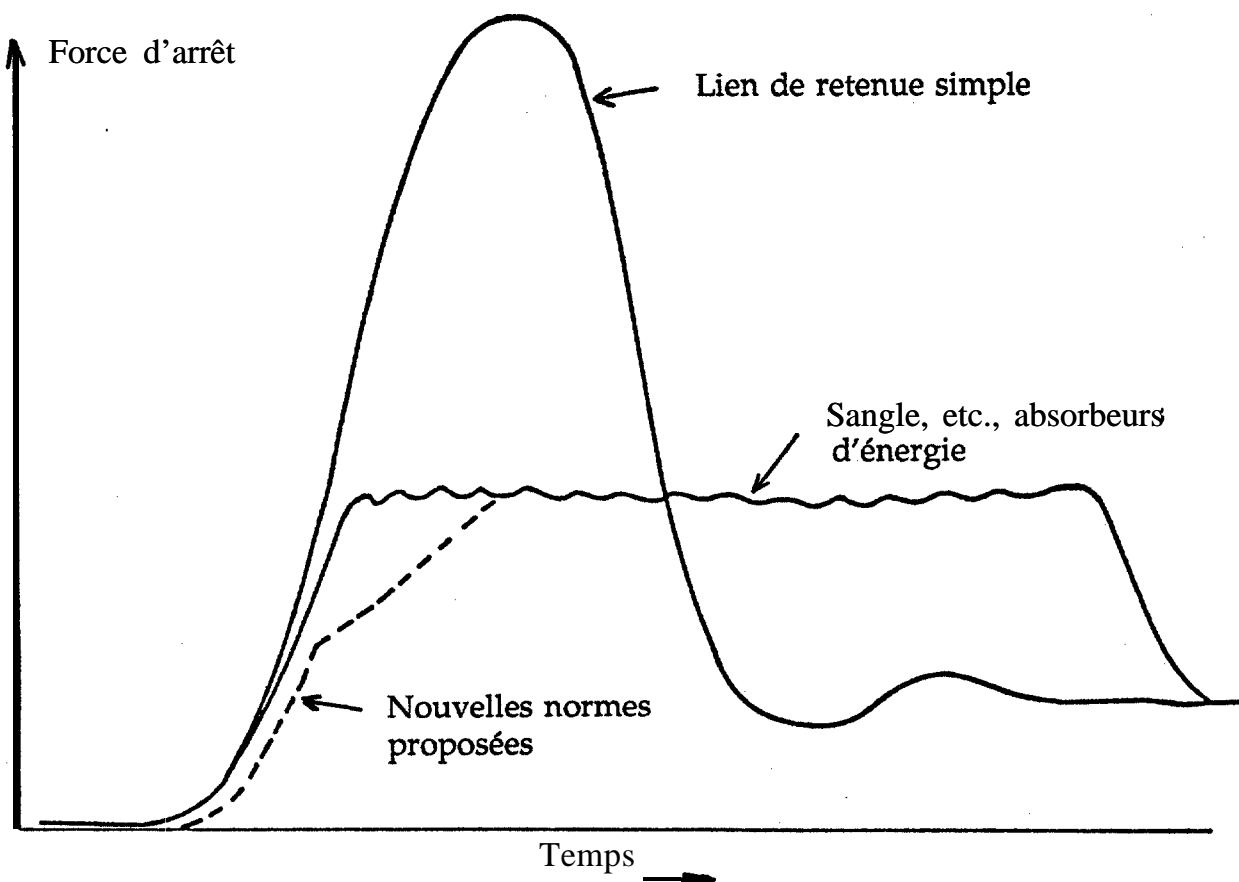
Fig 3d Lien à travers un étranglement



Fig 3e Bande métallique plissée

Figure 4

RESULTATS D'ESSAISTYPES



Comparaisons types des résultats Force/Temps lors de l'arrêt de chute avec un lien de retenue simple et des absorbeurs d'énergie

2.3. RÉSUMÉ - LIEN DE RETENUE

A partir de l'étude de l'influence de divers paramètres sur la force maximale d'arrêt générée dans le lien de retenue à point d'ancrage fixe, il ressort que :

1. Un câble d'acier ne doit jamais être utilisé seul comme lien de retenue pour un travailleur étant donné que la force maximale d'arrêt est énorme et excède de beaucoup la limite légale permise pour ne pas causer de lésions internes au travailleur. Cependant, un câble d'acier peut être utilisé avec un absorbeur d'énergie.
2. On utilise plutôt un câble en nylon, trois brins, afin de limiter la force maximale d'arrêt à environ 8 à 10 kN. L'utilisation d'un absorbeur d'énergie limitera la force maximale d'arrêt à 4 à 5 kN.
3. La force maximale d'arrêt croît avec la masse. Par exemple, pour le câble de nylon de 16 mm de diamètre, de 1.5 m de longueur, d'une hauteur de chute de 1.5 m, pour un accroissement de 10 Kg (0.1 kN) de masse, F_{\max} croît par 0.64 kN. On verra plus loin que F_{\max} croît plus vite pour un câble d'acier.
4. F_{\max} croît avec le diamètre du lien de retenue. On a intérêt à choisir un lien de retenue de diamètre convenable, par exemple un diamètre d'au moins 12.7 mm. Cependant, sur les chantiers, on utilise de préférence un lien de retenue de 16 mm (5/8") de diamètre pour les raisons suivantes :

usure du câble

défaut de fabrication

déformation

la résistance à la rupture d'un lien de retenue de 16 mm de diamètre est légèrement inférieure au double de la résistance à la rupture d'un lien de retenue de 12.7 mm de diamètre.

Exemple :

| Câble de nylon | d mm | Résistance à la rupture |
|----------------|-------|-------------------------|
| | 12.7 | 28 kN |
| | 15.88 | 46 kN |

5. F_{\max} décroît lorsque la longueur L du lien de retenue croît. On est donc amené à choisir un lien de retenue le plus long possible afin de minimiser la force maximale d'arrêt. Cependant, un compromis doit être fait quant à la longueur du lien de retenue afin d'éviter que le travailleur heurte un objet sous-jacent ou le plancher inférieur, et d'autre part la longueur L doit être telle que le travailleur ne soit pas gêné dans ses déplacements.
6. F_{\max} croît en fonction de la hauteur de chute. La hauteur de chute dépend de la position du travailleur au moment de la chute. Une façon d'éviter de trop grandes hauteurs de chute consiste à limiter la longueur du lien de retenue traitée au point 5 et d'avoir un point d'ancrage le plus haut possible.
7. F_{\max} croît lorsque le module d'élasticité croît. On a intérêt à choisir un type de lien de retenue de sorte que la force maximale d'arrêt soit limitée aux environs de 10 kN. Les liens de retenue en matières synthétiques (notamment le nylon) répondent à ce critère. Le câble d'acier est à proscrire car la force d'arrêt maximale est trop élevée et la dissipation de l'énergie de déformation se fait trop brutalement.
8. Si la force maximale d'arrêt du lien de retenue est trop grande, le travailleur peut subir des lésions internes aux organes mous (foie, rate, entre autres). Le risque de fouettement causant des lésions au cerveau ou des fractures est présent. Le projet de norme ISO/TC94/SC4/N.90 - 1988-04-20 art. 5.7.3 suggère la force de décélération acceptable pour l'être humain.

Avec une ceinture : force maximale d'arrêt 5 kN.

Avec un harnais : force maximale d'arrêt 8 kN.

2.4. CHOIX D'UN LIEN DE RETENUE

L'arrêt d'une chute par un système individuel d'arrêt de chute vise deux objectifs : éviter que la personne entre en contact avec un objet sous-jacent ou le plancher inférieur et minimiser la force maximale d'arrêt. L'étude de l'influence des paramètres m , d , L , E et H indique comment atteindre les deux objectifs. Le premier objectif est atteint en limitant la longueur du lien de retenue et en augmentant sa rigidité. Le deuxième objectif est atteint en diminuant la rigidité K du lien de retenue. Ces deux objectifs contradictoires sont conciliables. Un lien de retenue en nylon trois brins de 1 à 1.5 mètres de longueur et de 16 mm (5/8") de diamètre rencontre ces deux objectifs; un absorbeur d'énergie, encore mieux parce qu'il se déforme plastiquement à force constante. Avec un lien de retenue en

nylon trois brins de 16 mm de diamètre, et pour un facteur de chute unitaire (facteur de chute = hauteur de chute H/longueur du lien de retenue L), la force maximale d'arrêt pourrait être estimée à environ 10 kN pour éviter que le travailleur subisse des lésions internes. L'alinéa 2.10.12.3. (a) "ancré à un élément ayant une résistance à la rupture d'au moins 18 kN" du Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec découle de cette limite de 10 kN pour la force aximale d'arrêt. On note que les 18 kN comprennent déjà une marge de sécurité.

3. CONCEPTION D'UN SYSTÈME DE CÂBLE DE SECOURS HORIZONTAL

Article 2.10.12 du code de sécurité pour les travaux de construction

Alinéa 2.10.12.3

Le point d'attache du lien de retenue doit être:

- (a) ancré à un élément ayant une résistance à la rupture d'au moins 18 kilonewtons; ou
- (b) attaché à un dispositif antichute ou à une descendeur conforme à la norme Dispositif antichutes, descendeurs et cordes d'assurance ACNOR Z 259.2-M1979, relié à un câble de secours ou ancré à un élément ayant une résistance à la rupture d'au moins 18 kilonewtons; ou
- (c) attaché à un système de câble de secours horizontal et d'ancrages conçu par un ingénieur, ainsi qu'en fait foi un plan ou une attestation disponible sur les lieux même du chantier de construction; ou
- (d) attaché à un câble de secours horizontal conforme aux normes minimales suivantes:
 - (i) ce câble est un câble d'acier d'un diamètre minimum de 12 mm (1/2") relâché selon un angle minimum de 1 vertical pour 12 horizontal, soit 5° par rapport à l'horizontal;
 - (ii) sa portée entre les ancrages ne peut être supérieure à 12 m;
 - (iii) il est fixé à des ancrages ayant une résistance à la rupture d'au moins 90 kilonewtons.
 - (iv) il ne peut pas être utilisé par plus de deux travailleurs à la fois;

3.1. CABLE HORIZONTAL

Afin de comprendre le fonctionnement d'un câble de secours horizontal, on considère un câble non pesant de portée L , ancré aux points d'ancrage A et B situé sur le même plan horizontal. Comme le câble est non pesant, il prend la forme horizontale. Lorsqu'on applique une force F au centre du câble, ce dernier se déforme et prend une forme triangulaire, avec une tension T dans les deux côtés du câble et un angle α avec l'horizontale aux ancrages A et B.

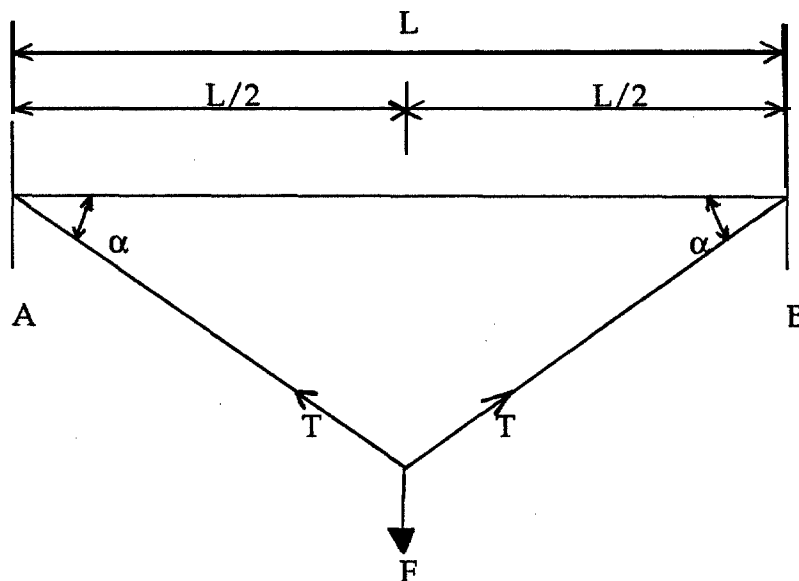
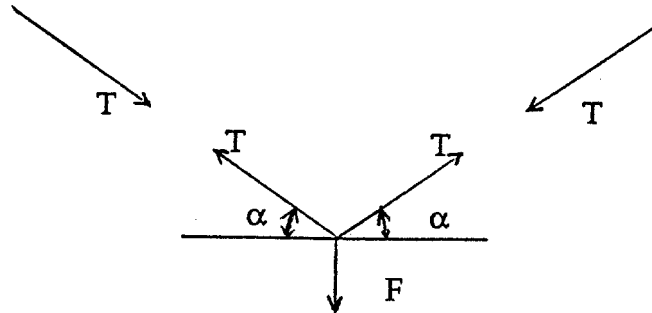


Figure 5

L'analyse du schéma du corps libre permet d'écrire



$$T \sin \alpha + T \sin \alpha = F$$

$$T = \frac{F}{2 \sin \alpha}$$

À l'ancrage

$$H = T \cos a = \frac{F}{2 \sin \alpha} \cos a$$

$$H = \frac{F}{2 \tan \alpha} = \frac{F}{2} \frac{\text{déplacement horizontal}}{\text{déplacement vertical}}$$

$$\tan a = \frac{\text{déplacement vertical (flèche)}}{\text{déplacement horizontal}} \frac{L}{2}$$

L'analyse des forces dans un câble horizontal non pesant montre qu'une force F appliquée au centre d'un câble développe une réaction aux points d'ancrage qui augmente plus l'angle est petit (figure 5). Il suffit de renverser la figure 5 pour constater que le problème est le même que celui des élingues.

3.2. CÂBLE DE SECOURS HORIZONTAL - ANALYSE SIMPLIFIÉE

Pour procéder à une analyse simplifiée du problème, il suffit de remplacer la force F de la figure 5 par la force maximum d'arrêt F_{\max} calculée à partir de la formule (1) du paragraphe 2.1. La solution est grossière, mais elle permet de comprendre le problème et l'importance des forces en jeu aux ancrages du câble horizontal. Ainsi, une personne ayant une masse de 100 Kg (soit un poids

d'environ 1 kN ou 220 lb) est soumise à une force maximale d'arrêt d'environ 10 kN et les ancrages doivent résister à 60 kN si la pente finale du câble est 1:12. Par ailleurs, si on applique la force de 18 kN au centre du câble, les ancrages doivent résister à 5.72×18 , soit 103 kN si la pente finale du câble est 1:12. Cette approche simplifiée rejoint l'alinéa 2.10.12.3.d (iv) du code de sécurité pour les travaux de construction du Québec: "les ancrages du câble de secours devront pouvoir résister à une force de rupture d'au moins 90 kN". Vu l'incertitude sur l'angle final α , on a pris la force d'ancrage à environ 5 fois 18 kN, soit 90 kN.

3.3. CONSTRUCTION DES ABAQUES DE LA FORCE MAXIMALE D'ARRÊT DE LA FORCE MAXIMALE D'ANCRAGE À PARTIR DES FORMULES DE LA STATIQUE OBTENUES À PARTIR DE L'ANALYSE PARABOLIQUE DEVELOPPEES EN ANNEXE D

Les formules suivantes sont utilisées pour construire les abaques de flèches et les abaques de la force maximale d'ancrage pour une masse de 0.981 kN (100 kg) qui chute à mi-portée. Les termes utilisés sont définis à la figure 6 à la page 21. Pour la chute de deux masses, les calculs sont très difficiles à résoudre analytiquement. Dès lors, on se base sur les essais expérimentaux. On peut consulter le rapport N° 83-294-H de A.C Sulowki et al pour déterminer la force maximale d'ancrage pour la chute de deux travailleurs.

Force maximale d'arrêt dans le lien de retenue

En première approximation, on assimile le point d'attache du mousqueton du lien de retenue au câble de secours horizontal comme un point d'ancrage fixe. La force maximale d'arrêt F_{\max} est donnée par la formule (1).

$$F_{\max} = mg \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2EA}{mgL} H} \right] \quad (1)$$

Équations de la parabole et de la flèche

$$y = \frac{wx^2}{T_1}$$

$$f = \frac{wx^2}{2T_1} \quad (5)$$

$$y' = \tan \alpha = \frac{wx}{T_1} \quad (2)$$

$$\text{À l'ancrage, } x = \frac{L}{2} ; \tan \alpha = \frac{wL}{2T_1}$$

$$S_a = \frac{L}{2} + \frac{w^2 L^3}{48T_1^2} \quad (9)$$

$$\text{À } x = \frac{L}{2} ; f_1 = \frac{wL^2}{8T_1} \quad (6)$$

$$f_2 = \frac{wL^2 + 2FL}{8T} \quad (7)$$

Force maximale d'ancrage

$$T^2 = \frac{F^2}{4\left[1 - \frac{(LAE)^2}{4S_a^2 (AE + T)^2}\right]}$$

Si on veut appliquer l'alinéa 2.10.12.3 (a) du Code de sécurité pour les travaux de la construction du Québec, on appliquera au centre de la figure 6 une force $F = 18$ kN et on déterminera par la statique la force maximale d'ancrage.

La formule (19) devient:

$$T^2 = \frac{324}{4\left[1 - \frac{(LAE)^2}{4S_a^2 (AE + T)^2}\right]} \quad (20)$$

Avec:

x abscisse, m

y ordonnée, m

α^0 angle du câble aux deux ancrages par rapport à l'horizontal

L portée du câble, m

A aire de la section du câble, mm^2

E module d'élasticité du câble, N/mm^2

T_1 tension initiale du câble, N

w poids linéaire du câble, N/m

S_a longueur du demi-arc de la parabole, m

f_1 flèche à mi-portée du câble sous l'effet du poids propre et de la tension initiale T_1 , m

f_2 flèche sous l'effet de la force maximale d'ancrage T , m

F force appliquée au centre du câble, kN
($F = 18$ kN si on applique l'alinéa du code)

T force maximale d'ancrage dans le câble, kN

Les abaques qui suivent ont été calculés pour le système de câble de secours couramment utilisé sur les chantiers du Québec:

Lien de retenue en nylon

| | | |
|---------------------|------------|---------------------|
| Longueur | = | 1.5 m |
| Diamètre | d = | 16 mm (5/8 “) |
| Aire | A = | 201 mm ² |
| Module d'élasticité | E = | 240 MPa |
| Facteur de chute | = | H/L |
| Masse qui chute | m = | 100 kg |

Le lien de retenue est attaché à mi-portée au câble de secours horizontal. En première approximation, on calculera la force maximale d'arrêt dans le lien de retenue en considérant que le point d'attache lien-câble est un point fixe. Le résultat constitue la borne supérieure de la force maximale d'arrêt dans le lien. Par exemple, pour ce lien de retenue, et pour un facteur de chute H/L = 1, la force F_{\max} est:

$$F_{\max} = \frac{100 \times 9.81 [1 + \sqrt{1 + 2 \times (240 \times 201 \times 1) / (100 \times 9.81)}}{10.759} \text{ kN}$$

Ou d'aires l'abaque 1, pour H/L = 1

$$F_{\max} = 10.759 \text{ kN}$$

En comparant F_{\max} calculée avec la formule à point d'ancrage fixe avec les résultats d'essais de Sulowski et al, on constate que F_{\max} est du même ordre de grandeur que la valeur de F_{\max} mesurée lors des essais de Sulowski et al (voir page 63 rapport n° 83-294-H).

Câble de secours horizontal en acier

Câble 6 x 25 IWRC grade 110/120

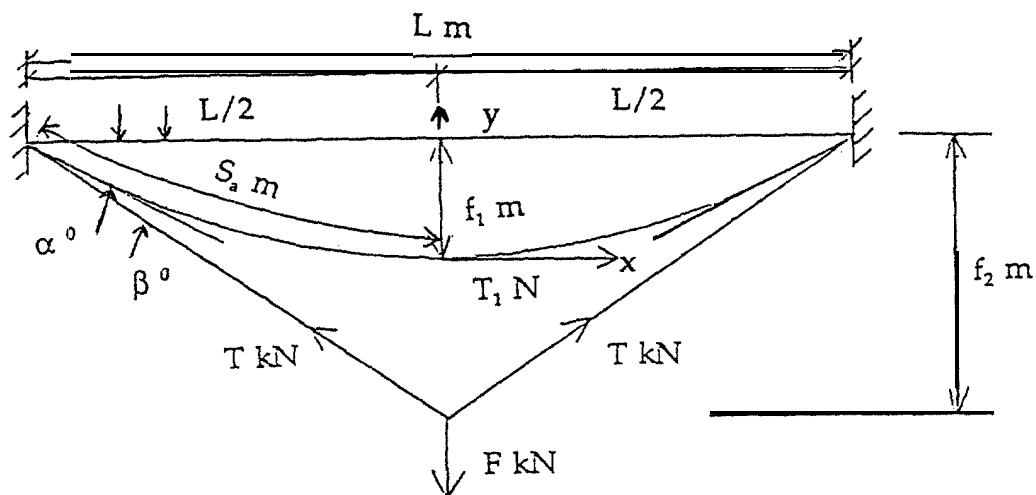
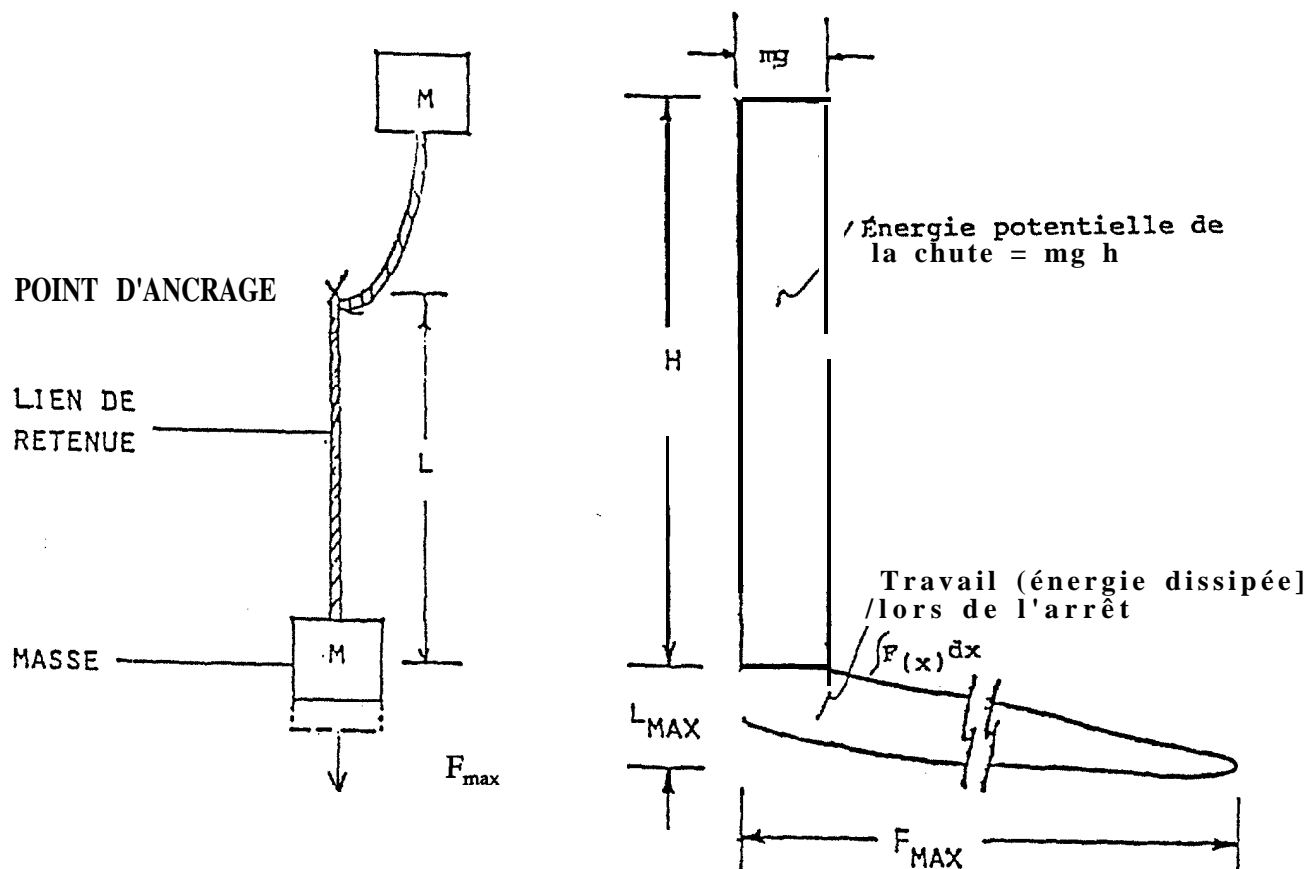
$$\text{Diamètre } d = 12.7 \text{ mm (1/2 “)}$$

$$\text{Aire } A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \times 12.7^2}{4} = 126.6769 \text{ mm}^2$$

$$\text{Module } E = 64.8 \times 10^9 \text{ Pa} = 64.8 \text{ kN/mm}^2$$

Les abaques sont construits pour la flèche initiale variant de 0.1 à 0.50 mètres et la portée variant de 3 m à 40 mètres.

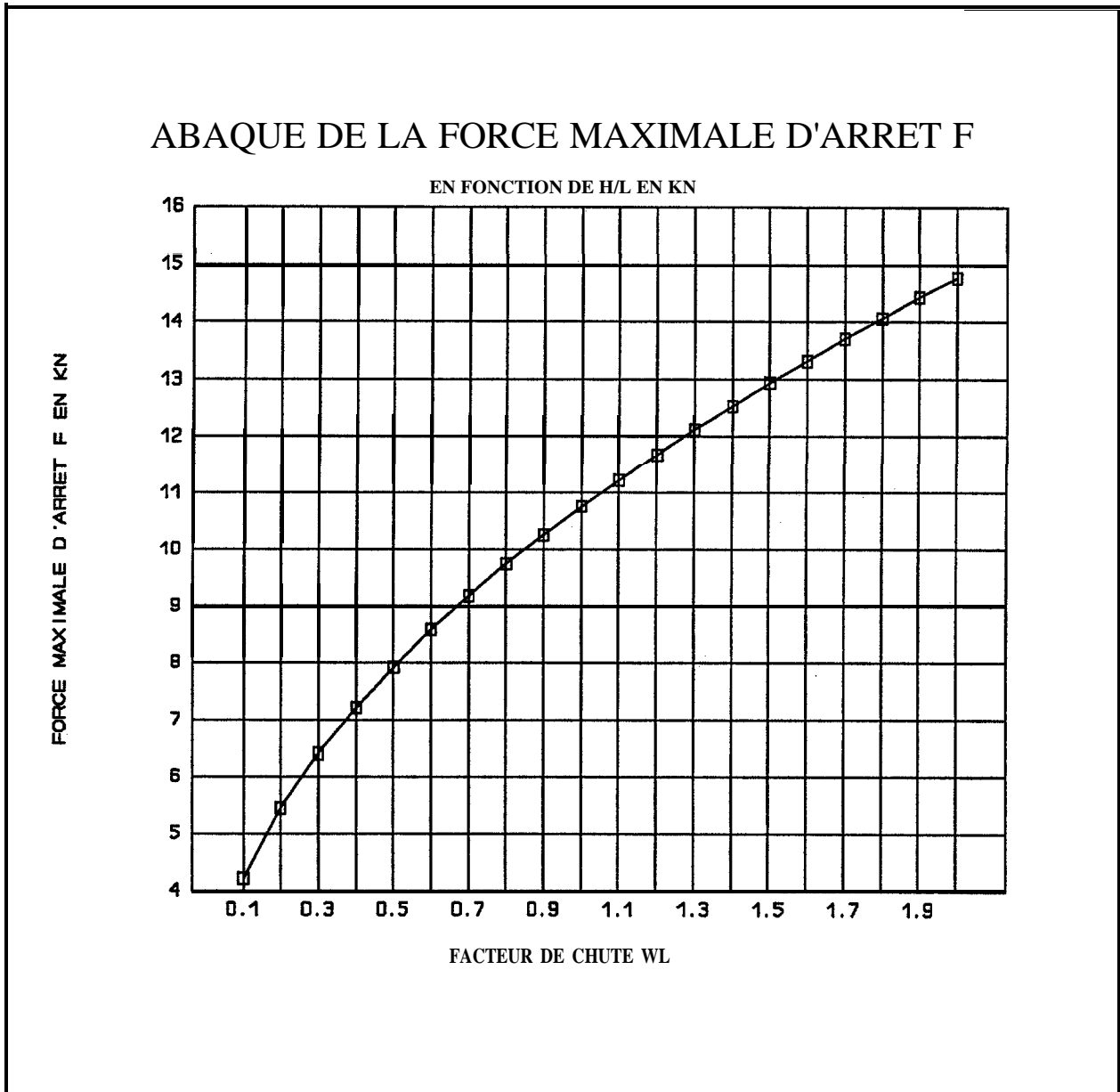
Figure 6. Définition des termes utilisés dans les abaques



Abaque 1
Force maximale d'arrêt / facteur de chute WL

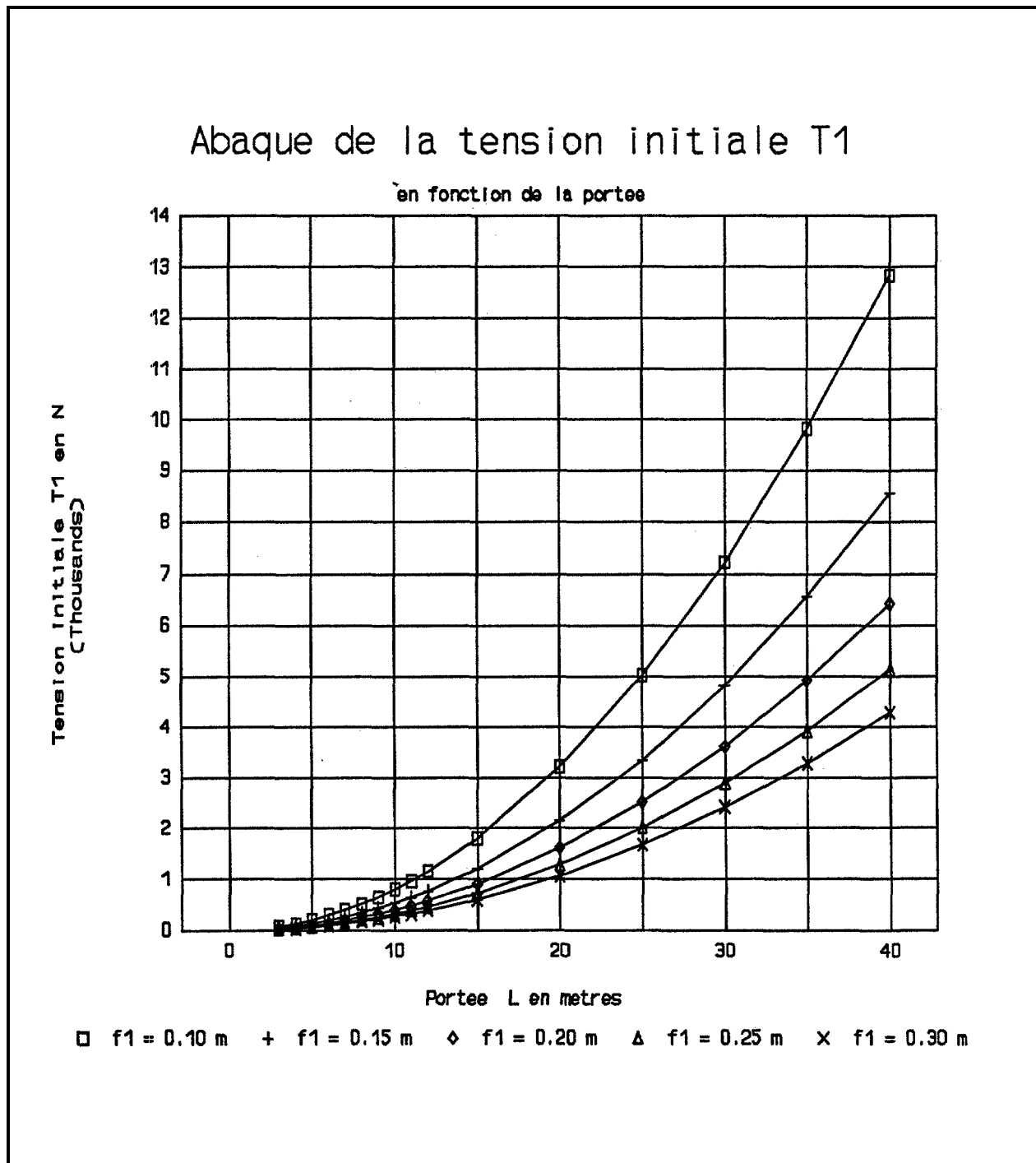
Lien de retenue de 16 mm (5/8 ") de diamètre ($A = 201 \text{ mm}^2$), de module d' élasticité $E = 240 \text{ MPa}$ et d'une masse $m = 0.981 \text{ kN}$ (100 kg)

$$F = mg \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2 EA}{mg L} H} \right]$$



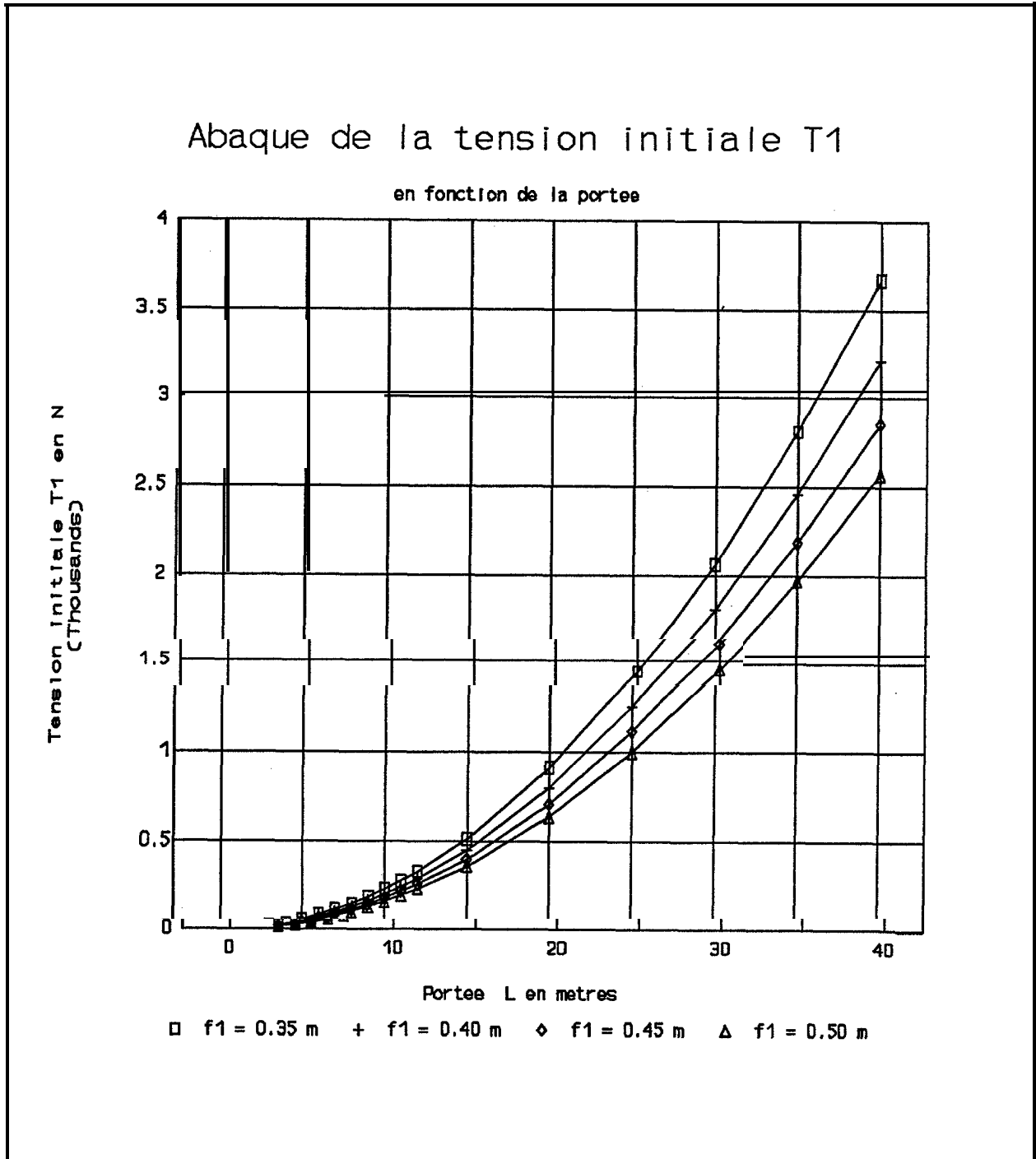
Abaque 2

Abaque de la Tension initiale T_1 N en fonction de la portée L en mètres paramétré par la flèche initiale f_1 pour un câble d'acier 6 x 25 IWRC grade 110/120 de 12.7 mm de diamètre, $w = 6.42$ N/m et $E = 64800$ MPa.



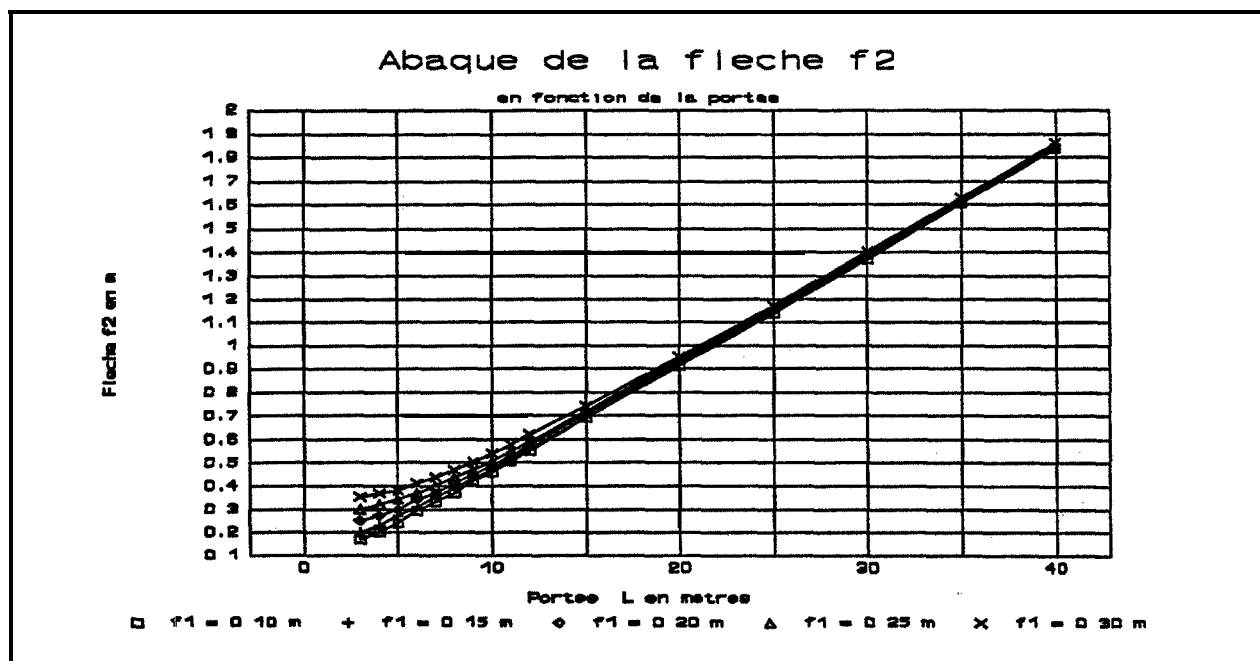
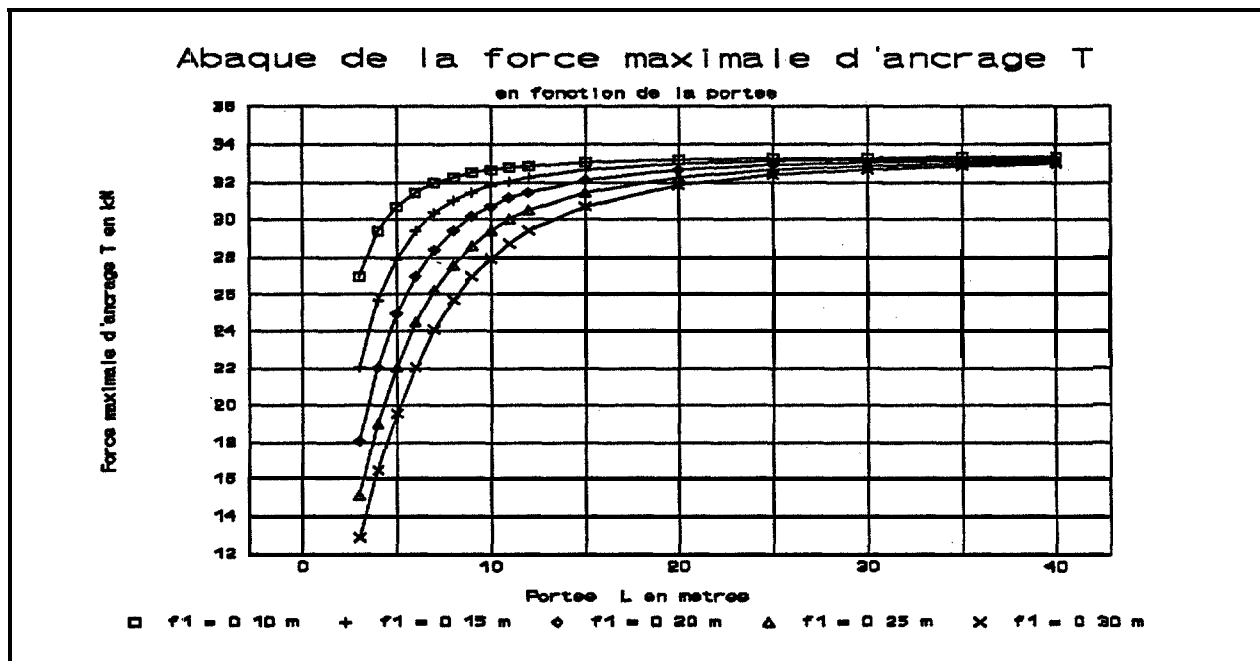
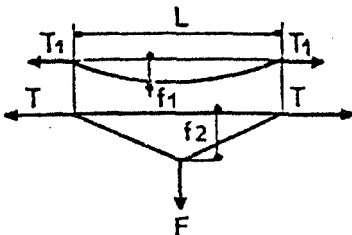
Abaque 3

Abaque de la Tension initiale T_1 N en fonction de la portée L en mètres paramétré par la flèche initiale f_1 pour un câble d'acier 6 x 25 IWRC grade 110/120 de 12.7 mm de diamètre, $w = 6.42$ N/m et $E = 64800$ MPa.



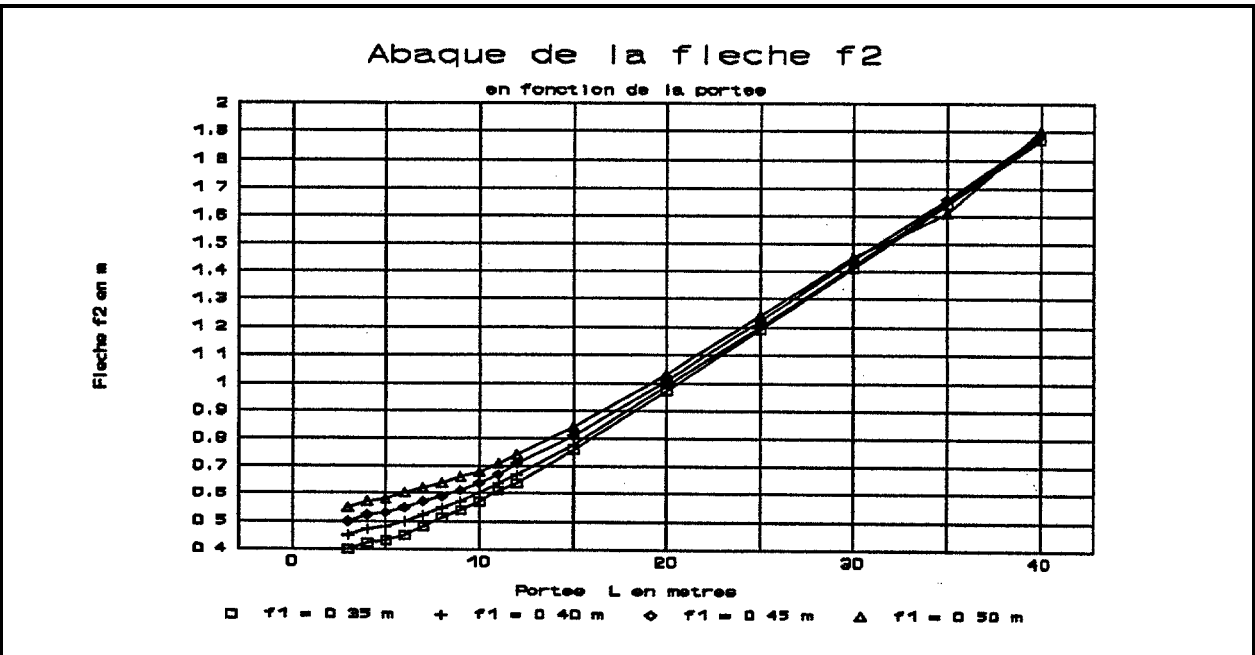
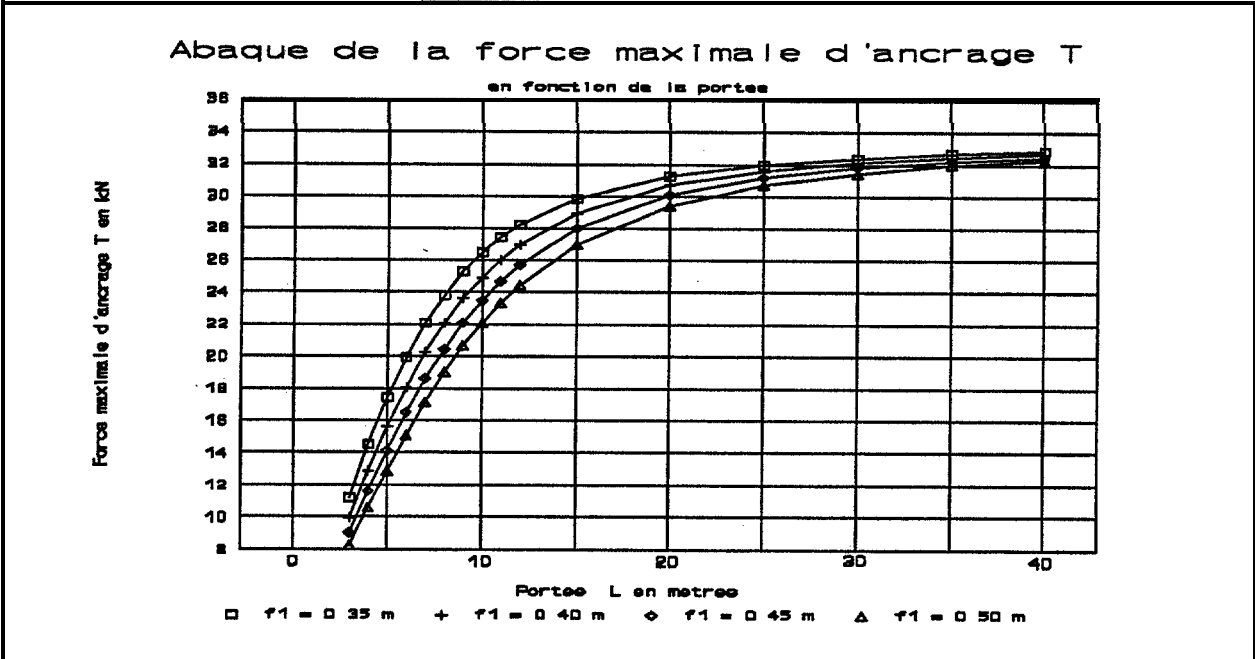
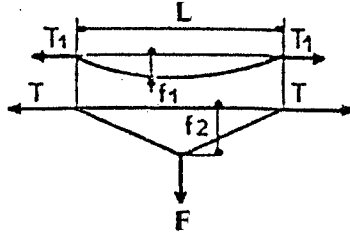
Abaque 4

Force maximale d'ancrage T kN, et flèche f_2 m en fonction de la portée L en mètres du câble paramètre par la flèche initiale f_1 m pour un câble d'acier 6 x 25 IWRC grade 110/120 de 12.7 mm de diamètre et $w = 6.42$ N/m, $E = 64800$ MPa pour $F = 6$ kN à mi-portée.



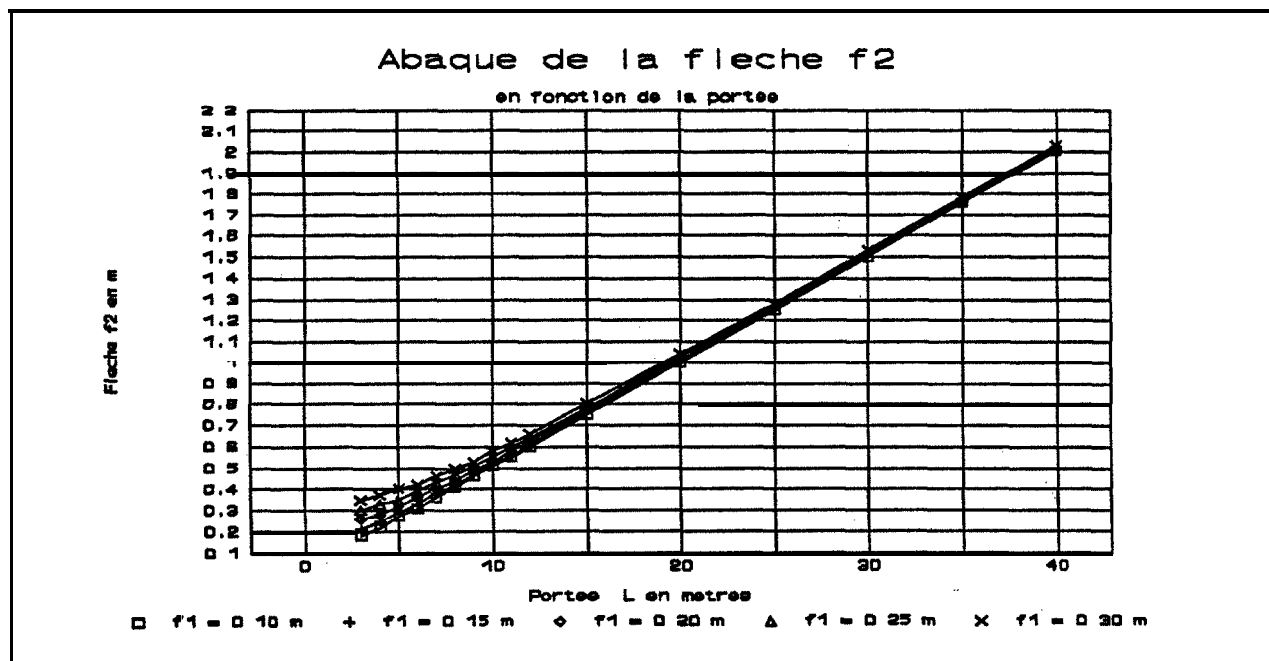
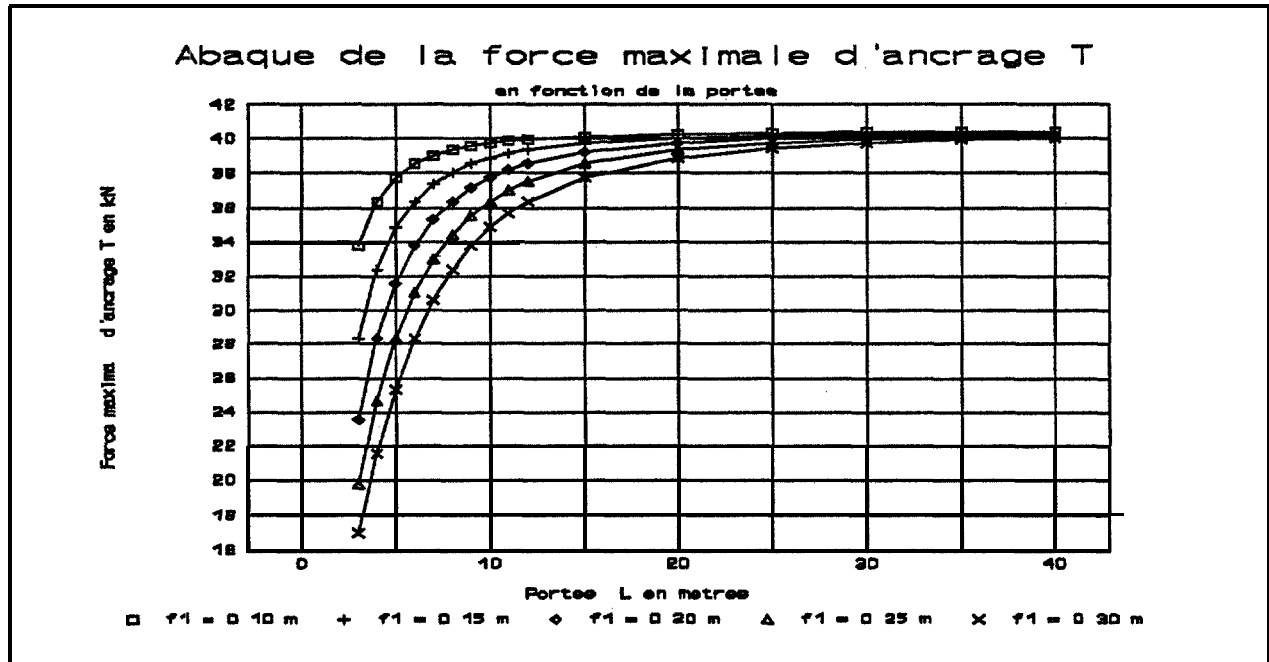
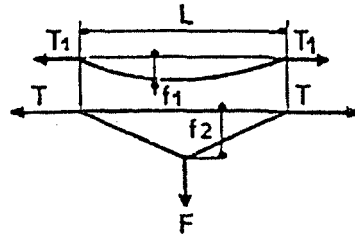
Abaque 5

Force maximale d'ancrage T kN, et flèche f_2 m en fonction de la portée L en mètres du câble paramètres par la flèche initiale f_1 m pour un câble d'acier 6 x 25 IWRC grade 110/120 de 12.7 mm de diamètre et $w = 6.42$ N/m, $E = 64800$ MPa pour $F = 6$ kN à mi-portée.



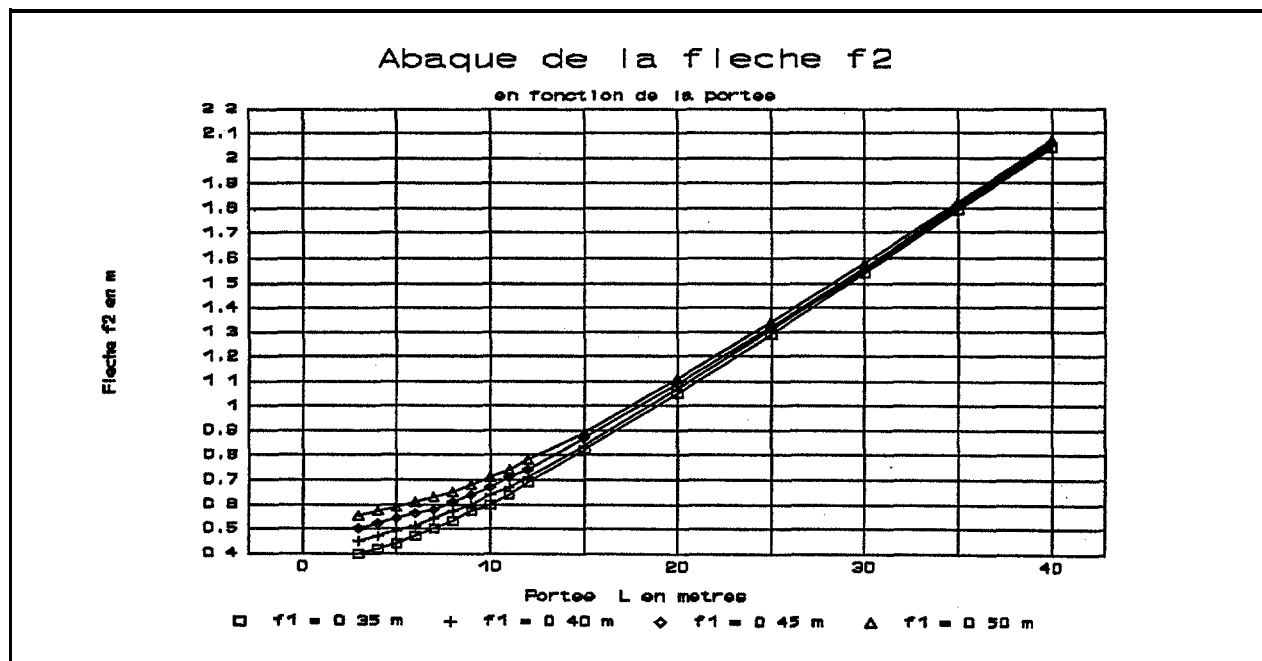
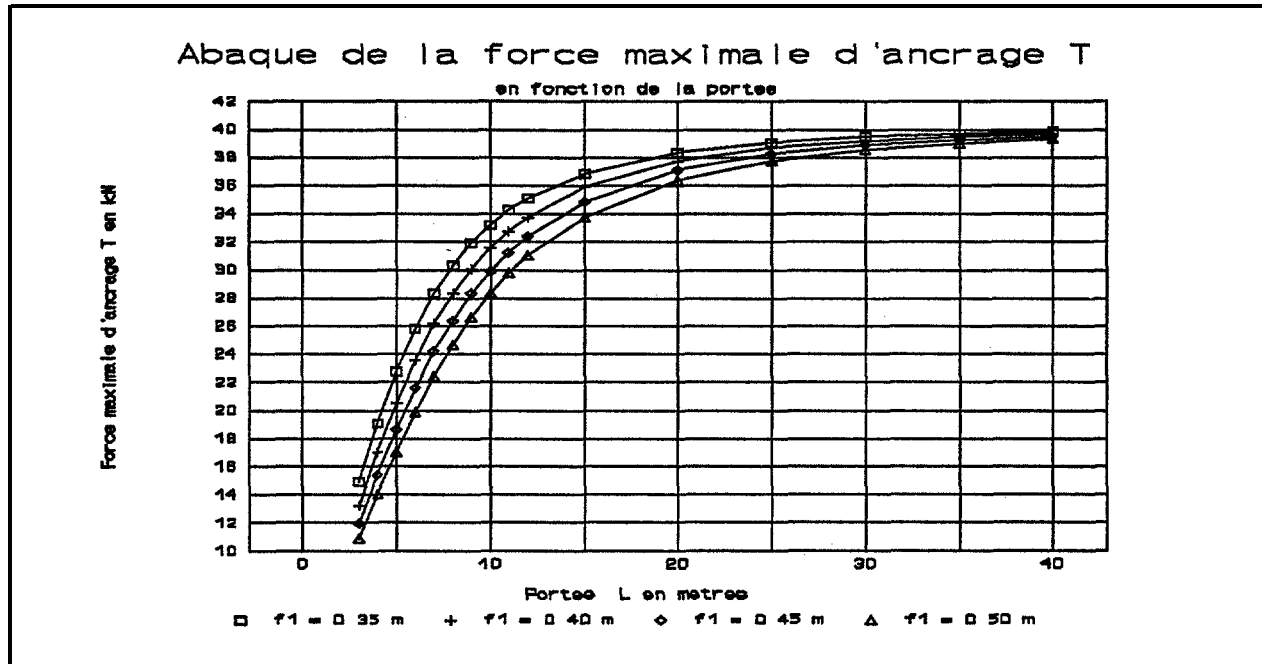
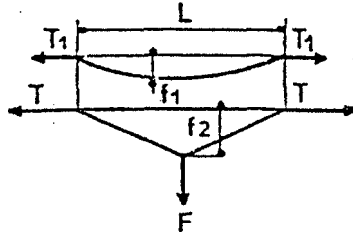
A b a q u e 6

Force maximale d'ancrage T kN, et flèche f_2 m fonction de la portée L en mètres du câble paramètres par la flèche initiale f_1 m pour un câble d'acier 6 x 25 IWRC grade 110/120 de 12.7 mm de diamètre et $w = 6.42$ N/m, $E = 64800$ MPa pour $F = 8$ kN à mi-portée.



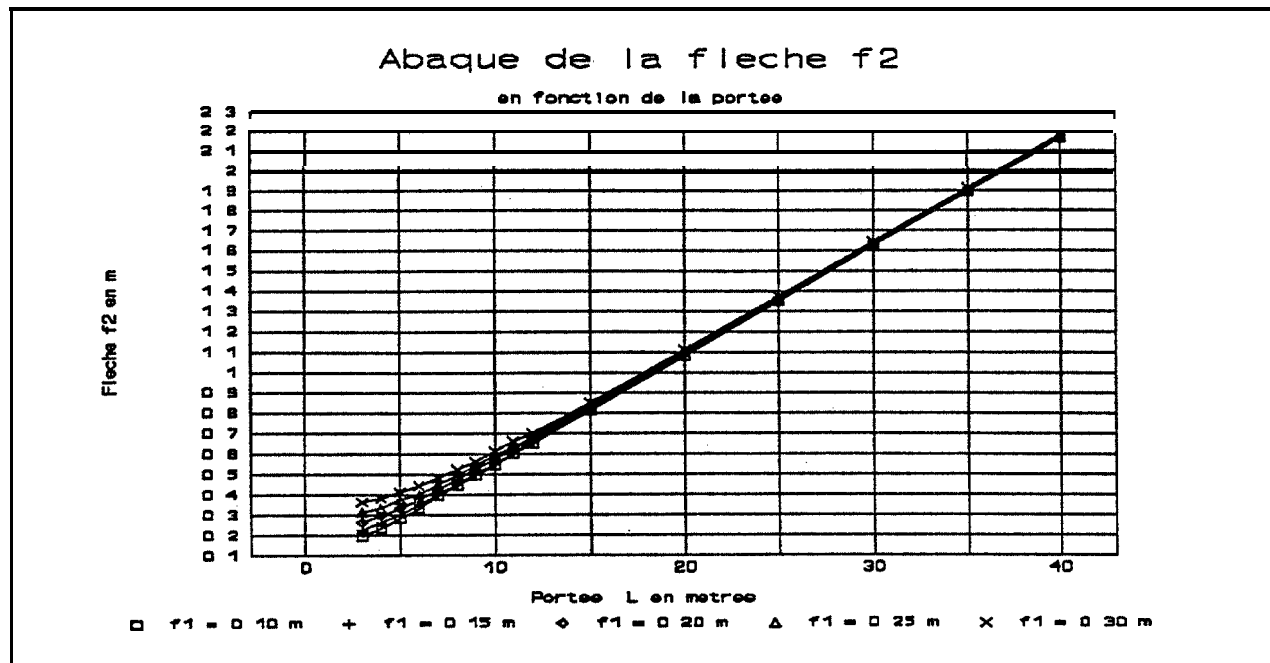
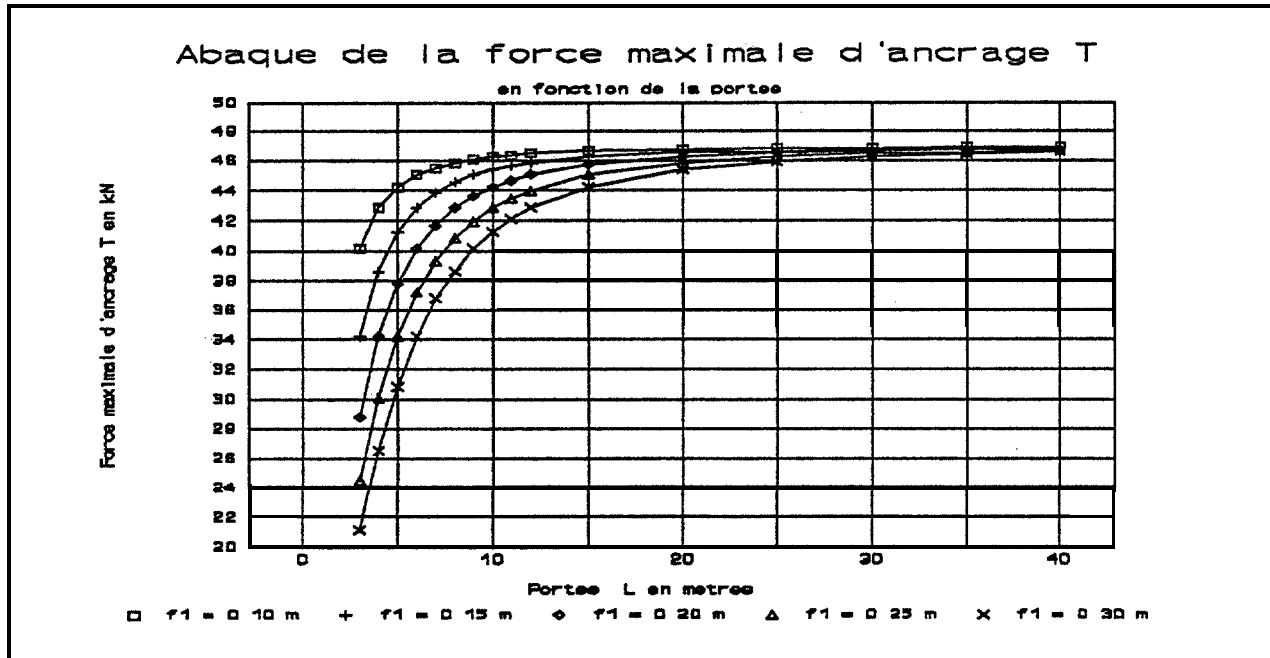
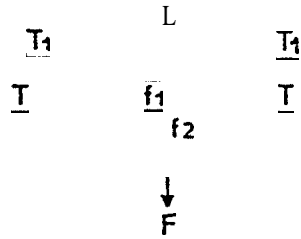
Abaque 7

Force maximale d'ancrage T kN, et flèche f_2 m en fonction de la portée L en mètres du câble paramétrés par la flèche initiale f_1 m pour un câble d'acier 6 x 25 IWRC grade 110/120 de 12.7 mm de diamètre et $w = 6.42$ N/m, $E = 64800$ MPa pour $F = 8$ kN à mi-portée.



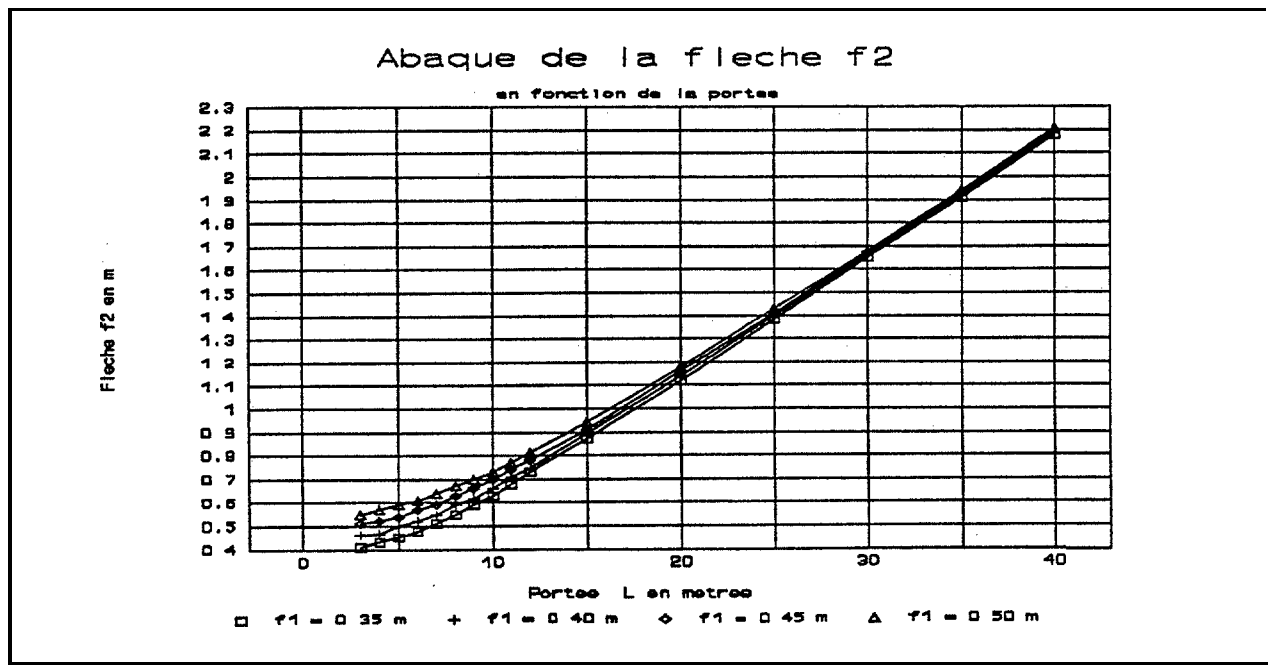
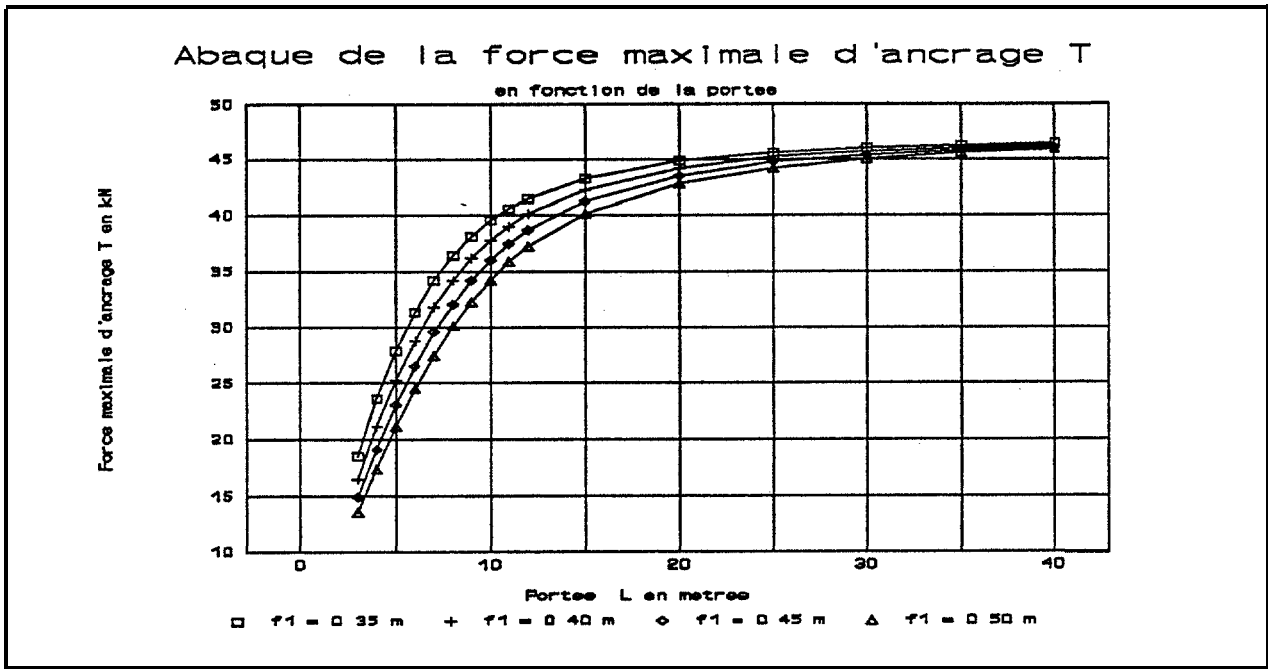
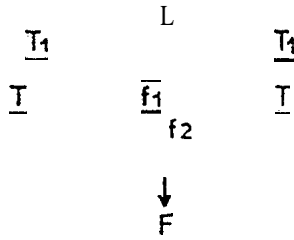
Abaque 8

Force maximale d'ancrage T kN, et flèche f_2 m en fonction de la portée L en mètres du câble paramètre par la flèche initiale f_1 m pour un câble d'acier 6 x 25 IWRC grade 110/120 de 12.7 mm de diamètre et $w = 6.42$ N/m, $E = 64800$ MPa pour $F = 10$ kN à mi-portée.



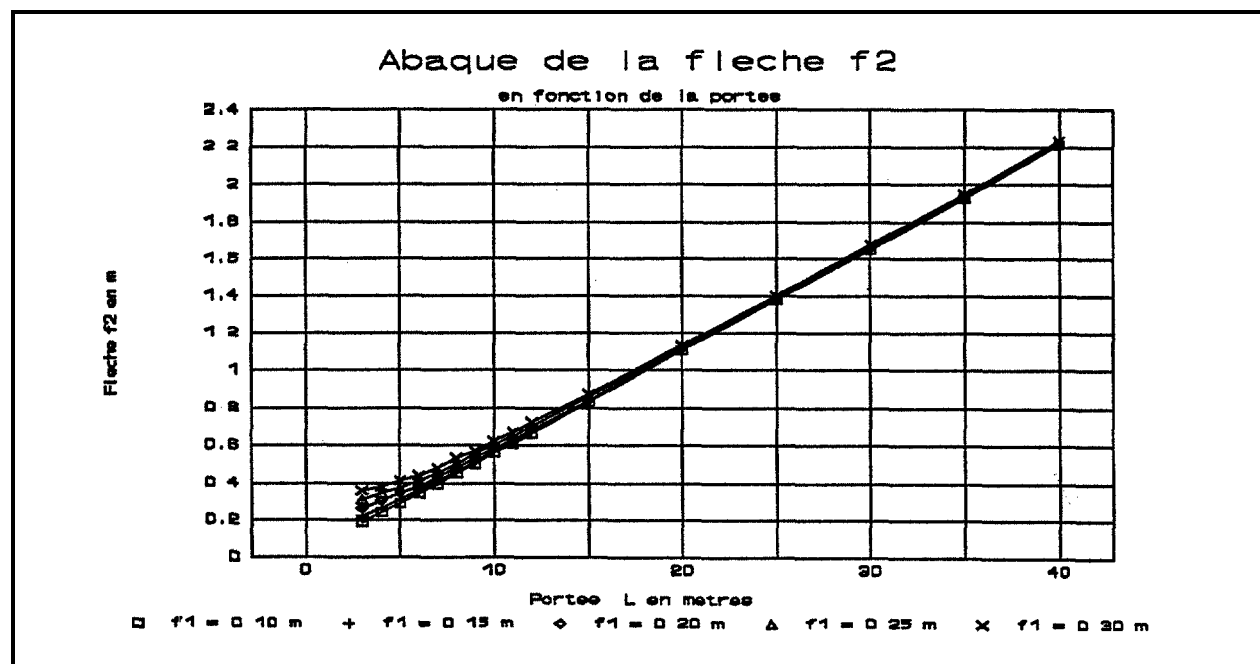
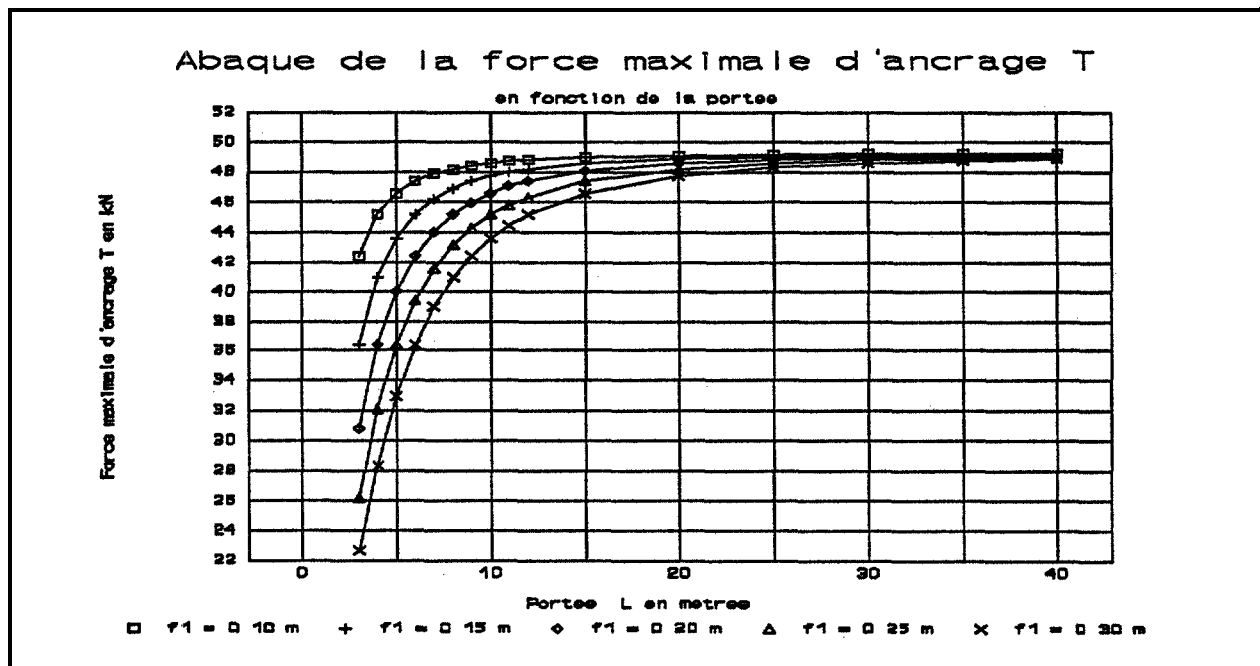
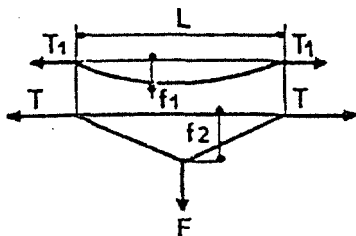
Abaque 9

Force maximale d'ancrage T kN, et flèche f_2 m en fonction de la portée L en mètres du câble paramétrés par la flèche initiale f_1 m pour un câble d'acier 6 x 25 IWRC grade 110/120 de 12.7 mm de diamètre et $w = 6.42$ N/m, $E = 64800$ MPa pour $F = 10$ kN à mi-portée.



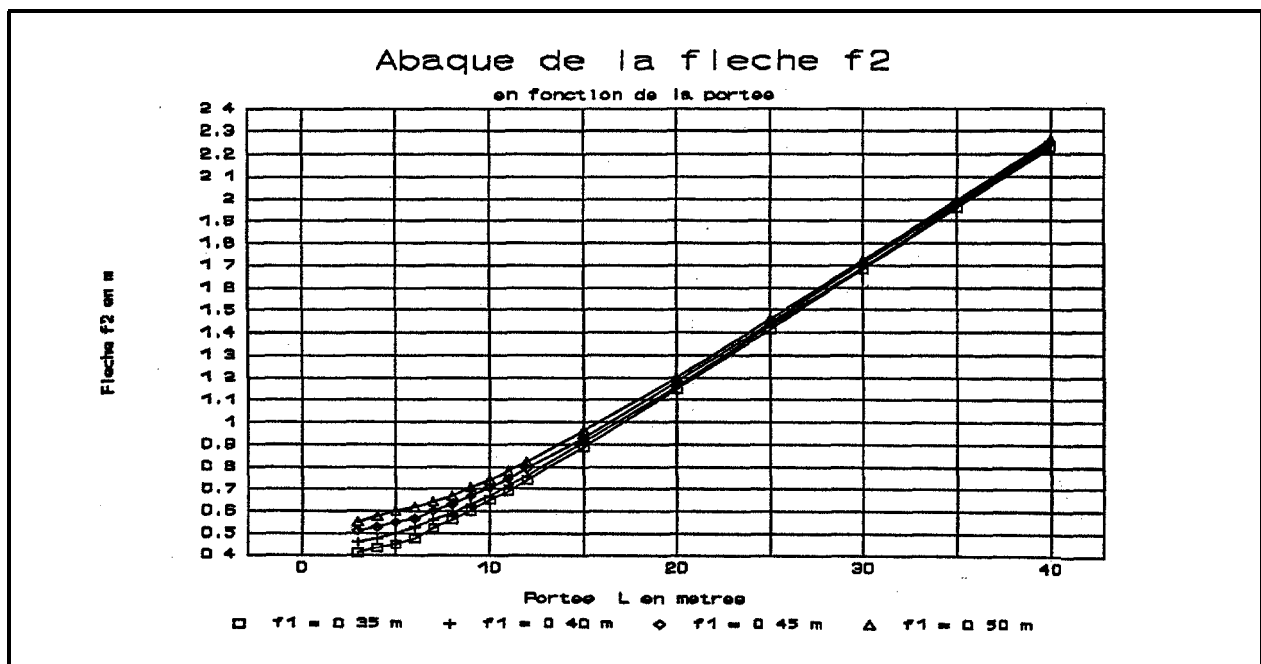
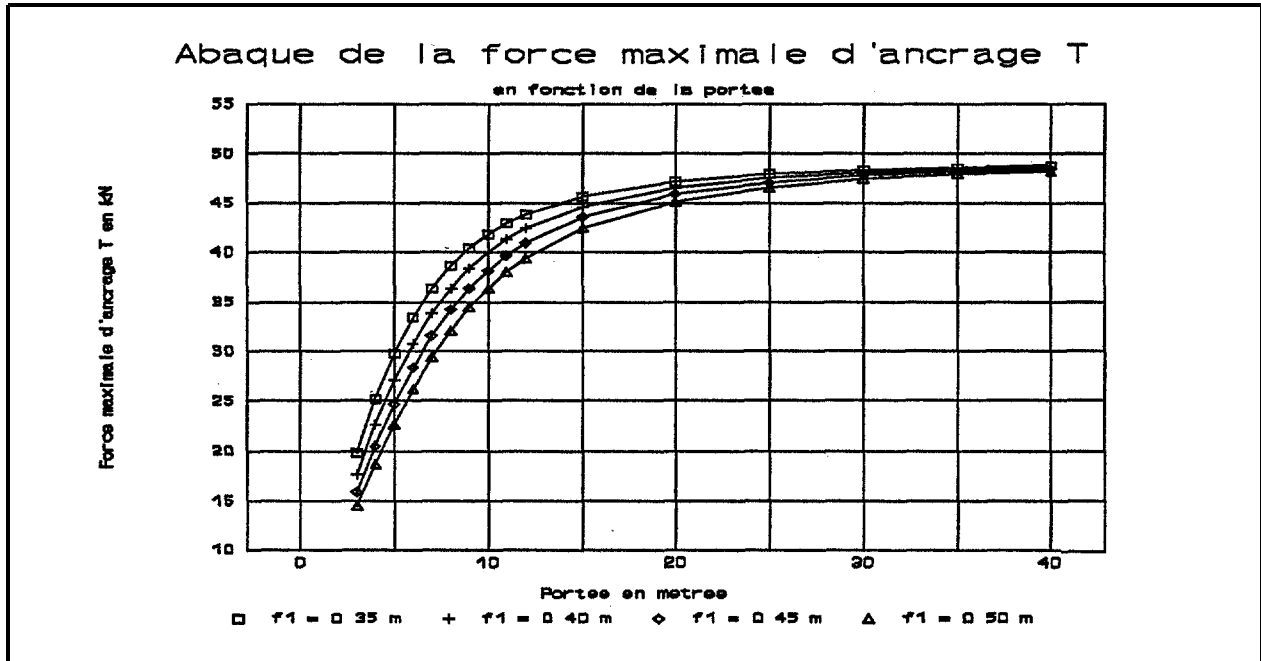
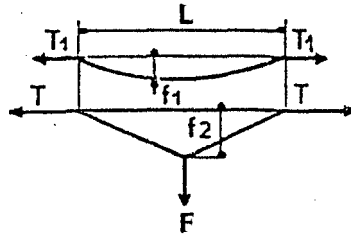
Abaque 10

Force maximale d'ancrage T kN, et flèches f_2 m en fonction de la portée L en mètres du câble paramétrés par la flèche initiale f_1 m pour un câble d'acier 6 x 25 IWRC grade 110/120 de 3.2.7 mm de diamètre et $w = 6.42$ N/m, $E = 64800$ MPa pour $F = 10.759$ kN à mi-portée.



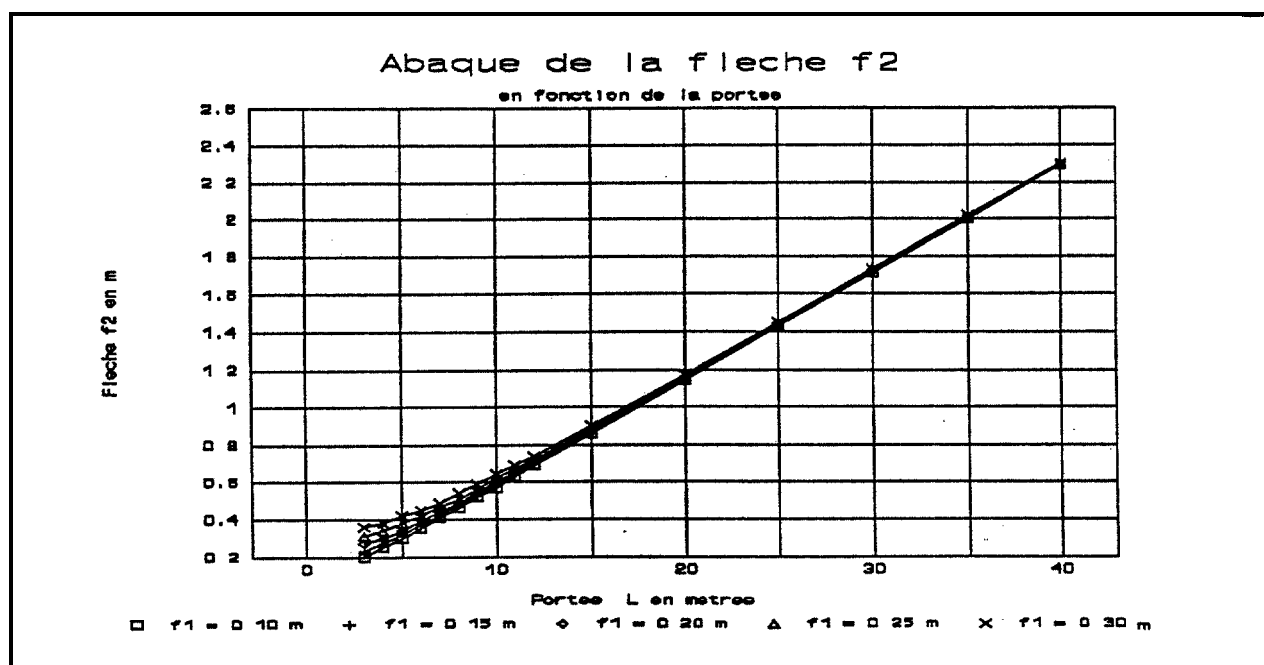
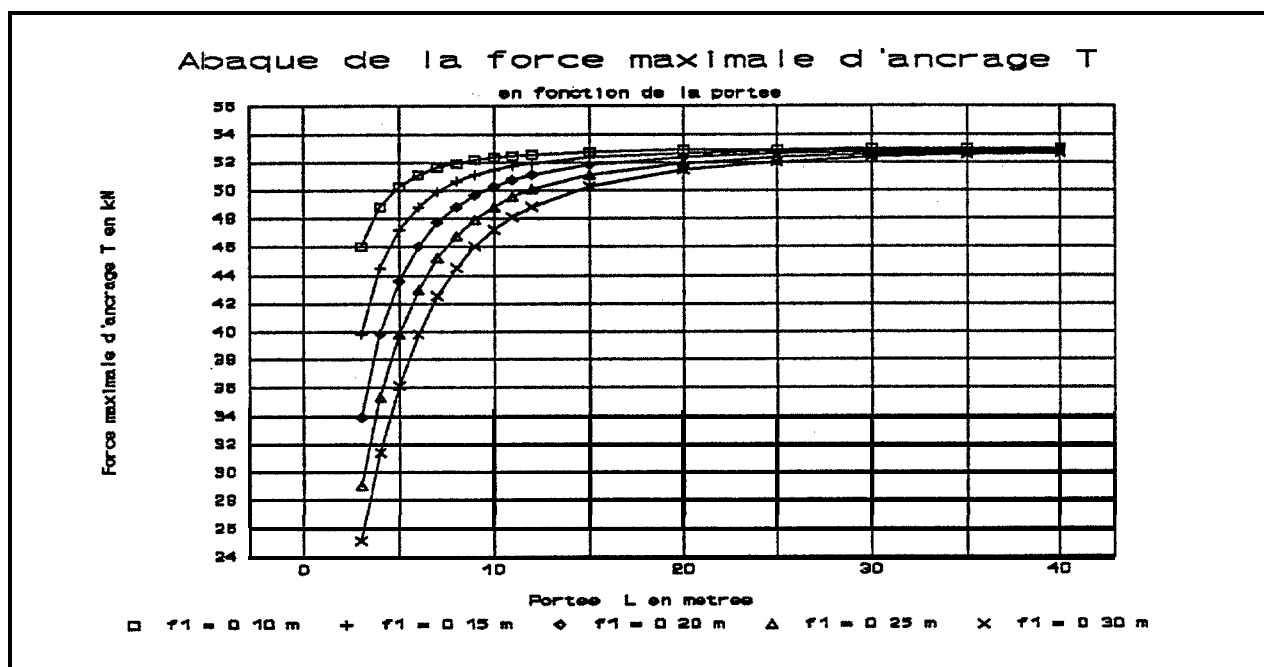
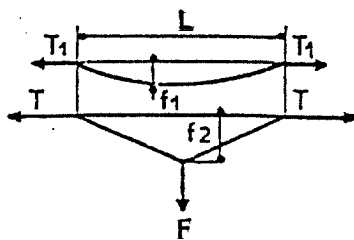
Abaque 11

Force maximale d'ancrage T kN, et flèche f_2 m en fonction de la portée L en mètres du câble paramétrés par la flèche initiale f_1 m pour un câble d'acier 6 x 25 IWRC grade 110/120 de 12.7 mm de diamètre et $w = 6.42$ N/m, $E = 64800$ MPa pour $F = 10.759$ kN à mi-portée.



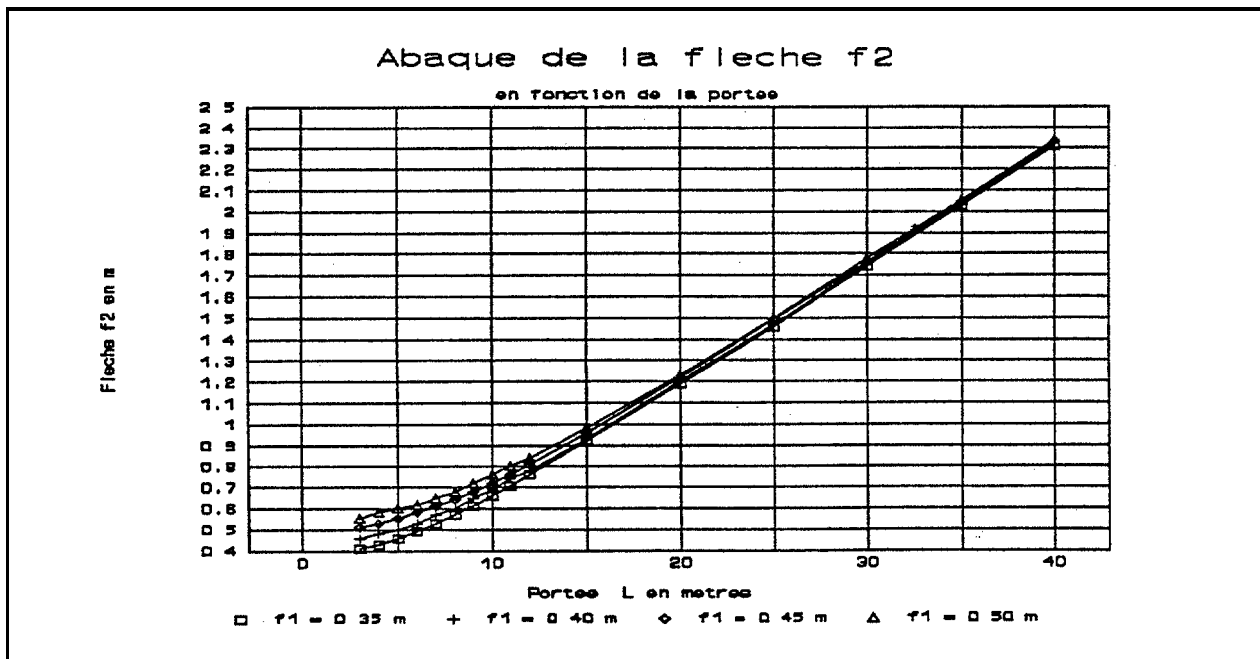
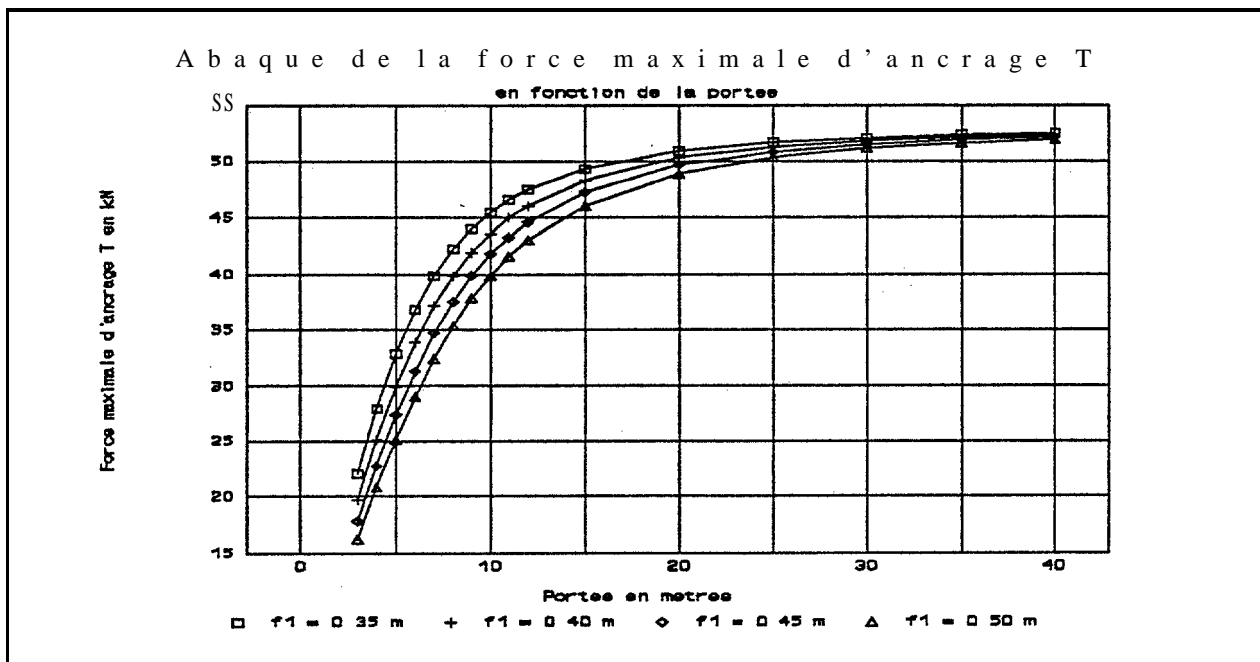
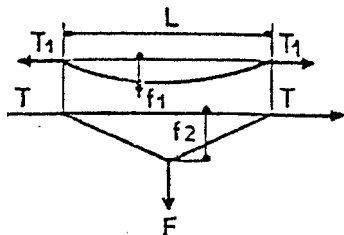
Abaque 12

Force maximale d'ancrage T kN, et flèche f_2 m en fonction de la portée L en mètres du câble paramétrés par la flèche initiale f_1 m pour un câble d'acier 6 x 25 IWRC grade 110/120 de 12.7 mm de diamètre et $w = 6.42$ N/m, $E = 64800$ MPa pour $F = 12$ kN à mi-portée.



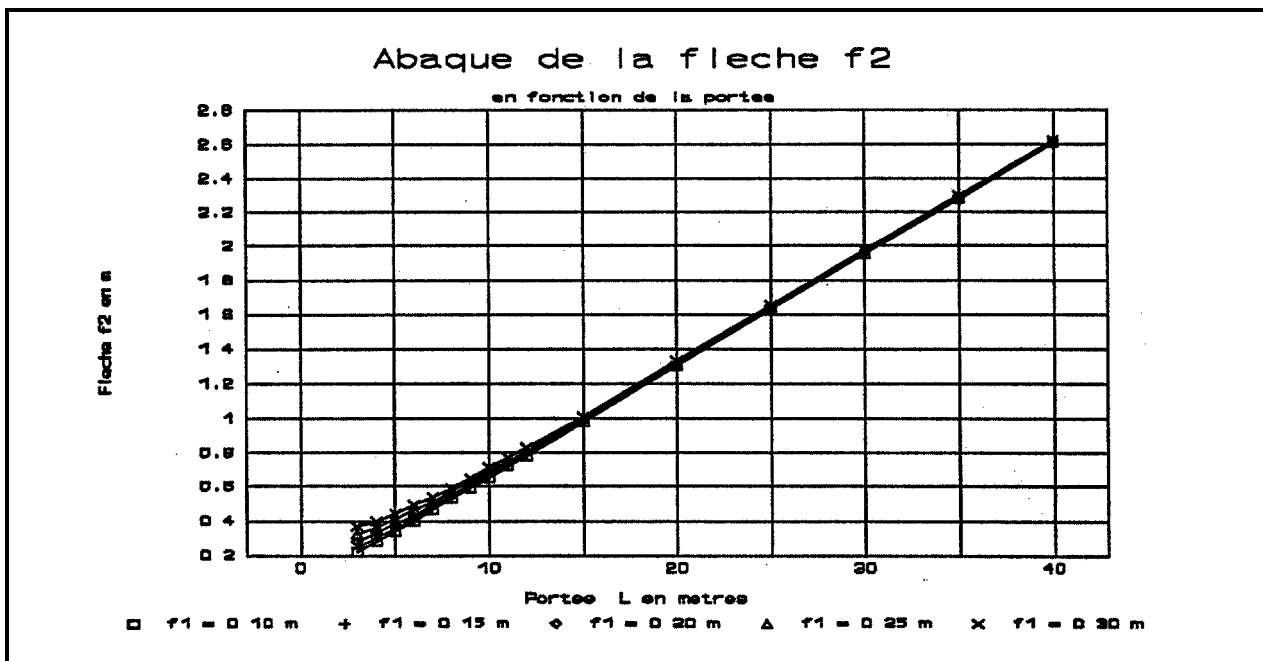
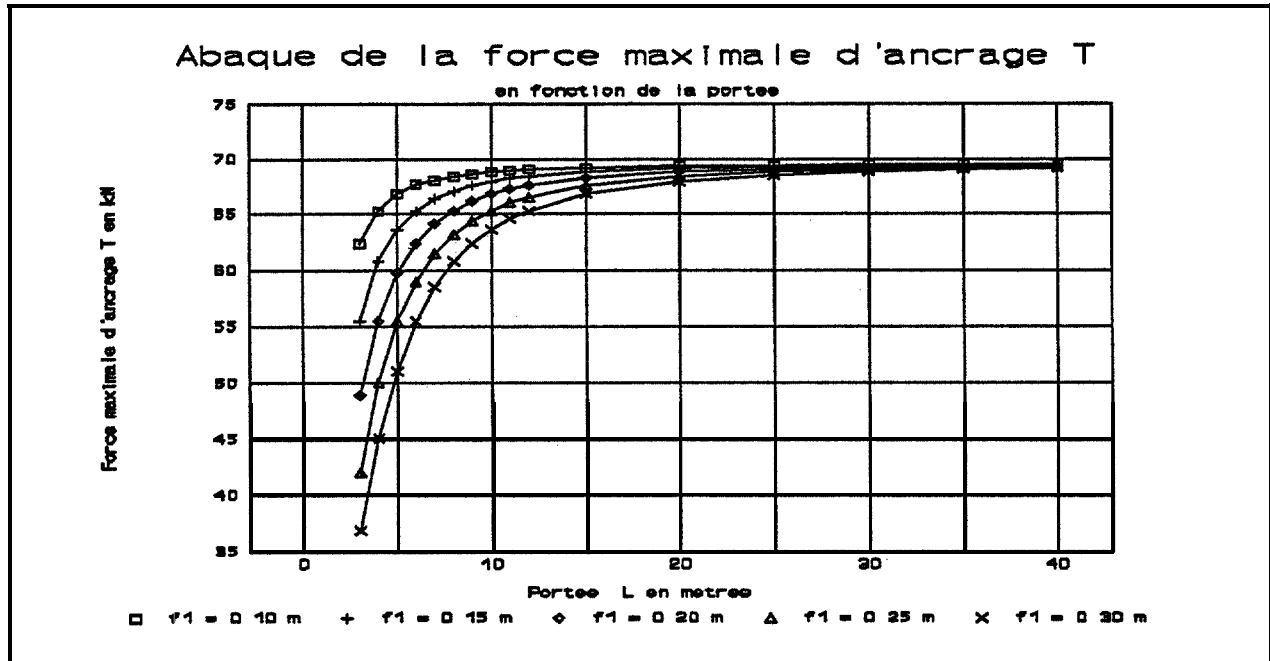
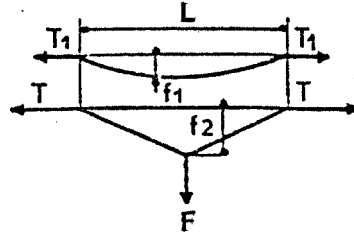
Abaque 13

Force maximale d'ancrage T kN, et flèche f_2 m en fonction de la portée L en mètres du câble paramétrés par la flèche initiale f_1 m pour un câble d'acier 6 x 25 IWRC grade 110/120 de 12.7 mm de diamètre et $w = 6.42$ N/m, $E = 64800$ MPa pour $F = 12$ kN à mi-portée.



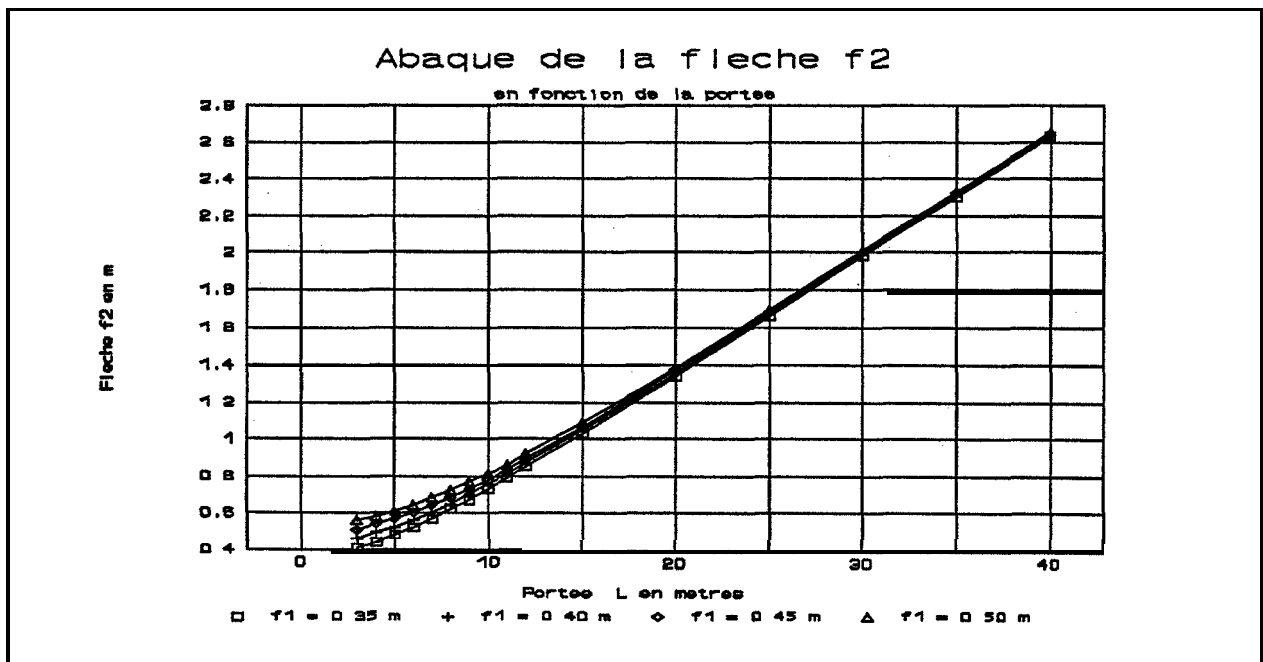
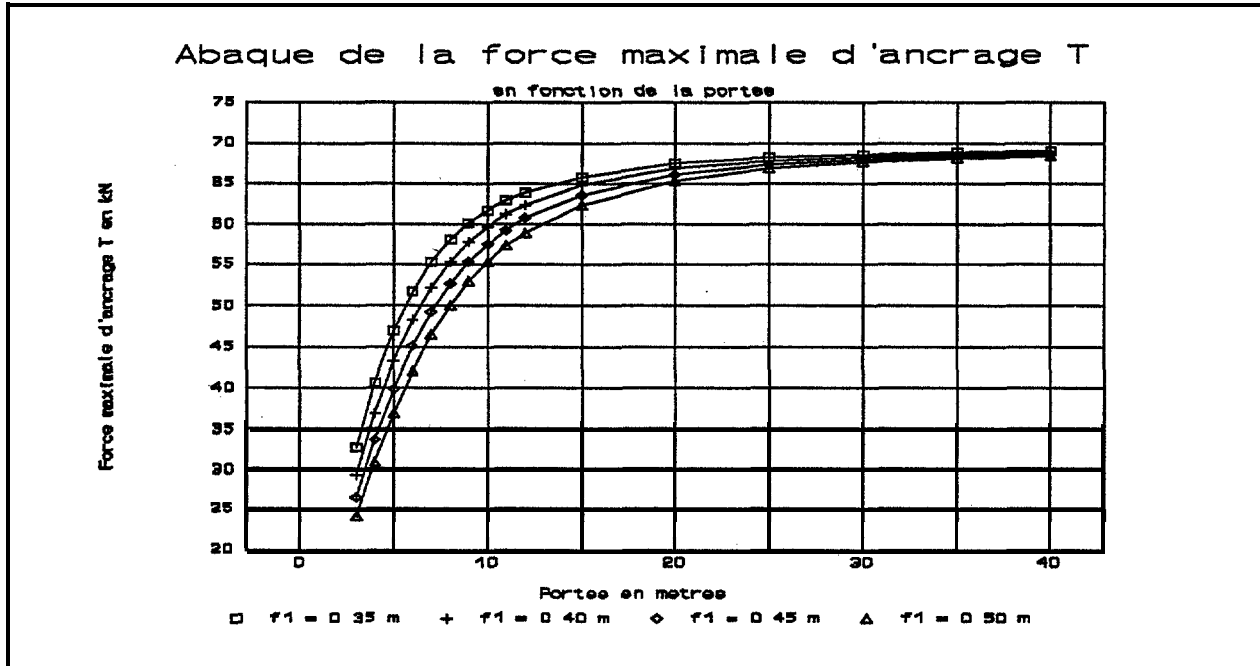
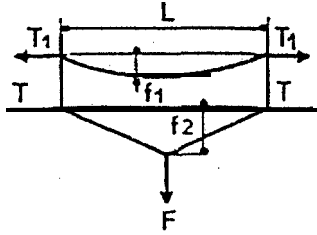
Abaque 14

Force maximale d'ancrage T kN, et flèche f_1 m en 'fonction de la portée L en mètres du câble paramétrés par la flèche initiale f_1 m pour un câble d'acier 6 x 25 IWRC grade 110/120 de 12.7 mm de diamètre et $w = 6.42$ N/m, $E = 64800$ MPa pour $F = 18$ kN à mi-portée (alinéa 2.10.12.3.a).



Abaque 15

Force maximale d'ancrage T kN, et flèche f_2 m en fonction de la portée L en mètres du câble paramétrés par la flèche initiale f_1 m pour un câble d'acier 6 x 25 IWRC grade 110/120 de 12.7 mm de diamètre et $w = 6.42$ N/m, $E = 64800$ MPa pour $F = 18$ kN à mi-portée (alinéa 2.10.12.3.a).



4. ANALYSE THÉORIQUE ET ESSAIS EXPÉRIMENTAUX D'ONTARIO HYDRO

L'approche simplifiée du câble de secours horizontal à l'aide d'un câble non pesant auquel on applique une force F au centre du câble permet de comprendre le problème et l'importance des forces en jeu aux ancrages du câble horizontal. Cependant elle ne reflète pas le comportement réel d'un système de câble de secours horizontal auquel on attache le lien de retenue du travailleur. Par exemple, cette approche simplifiée ne prend nullement en compte l'effet amortissant du câble de secours horizontal, de la portée du câble, de la nature du câble (acier ou nylon). Devant la complexité d'un tel problème et vu le nombre important de paramètres à étudier, Ontario Hydro a procédé à une étude théorique du système de câble de secours horizontal - lien de retenue, qu'on décrit en annexe C, et a mis au point un programme informatique pour simuler les diverses conditions d'utilisation sur les chantiers. Puis, Ontario Hydro a réalisé des essais de chute libre d'après les mêmes conditions analysées par le programme informatique afin d'effectuer une analyse comparative de l'étude théorique par rapport aux essais.

4.1. RÉSUMÉ - ESSAIS EXPÉRIMENTAUX ET DISCUSSION

Les résultats des essais d'Ontario Hydro peuvent être classés en trois différentes catégories, parmi lesquelles on trouve :

les données expérimentales;

la méthode graphique simplifiée pour la conception de systèmes de câble de secours horizontal - lien de retenue;

l'analyse théorique informatisée pour la conception détaillée de systèmes de câble de secours horizontal - lien de retenue.

Lors des essais, on a observé que la force maximale d'ancrage et la force maximale d'arrêt diminuent lorsque la portée du câble de secours horizontal augmente; par contre, la distance totale de chute augmente lorsque la portée du câble de secours horizontal augmente. Cependant, la force maximale d'ancrage la plus élevée semble se produire quelque part entre 3 et 10 m de portée. La force maximale d'ancrage pour une portée de 3 m est inférieure à la force maximale d'ancrage pour une portée de 10 m. Les chercheurs pensent que l'effet de la rigidité d'ancrage, et plus particulièrement la technique d'attache du câble aussi bien que la rigidité du banc d'essai, influencent davantage les câbles de petites portées et, par conséquent, produisent des forces maximales d'ancrage inférieures.

Une tension initiale élevée du câble de secours horizontal produit des forces maximales d'ancrage et des distances totales de chute plus élevées, mais des forces maximales d'arrêt inférieures. La tension initiale paraît ne pas influencer d'une façon significative les forces maximales d'arrêt et les distances totales de chute comme on s'y attendait, particulièrement pour un câble de petite portée.

Comme prévu, les distances de chute élevées de masses produisent des forces maximales d'ancrage et des distances totales de chute élevées. Les câbles métalliques produisent des forces maximales d'ancrage et des forces maximales d'arrêt élevées et des distances totales de chute plus courtes alors que les câbles synthétiques produisent des forces maximales d'ancrage et des forces maximales d'arrêt inférieures, mais des distances totales de chute élevées. Parmi l'ensemble des câbles testés, Ontario-Hydro a constaté que le permacâble montrait des qualités supérieures de maniabilité et de résistance par rapport aux autres. Le câble métallique de 1/2" de diamètre convient pour les conditions de chute d'un travailleur, et le câble de 5/8" de diamètre est requis pour les conditions de chute de deux travailleurs bien qu'il soit rigide et lourd à manutentionner. Le câble de nylon de 5/8" de diamètre peut être utilisé lorsqu'une grande distance totale de chute est permise. Les essais ont montré qu'un câble métallique de 3/8" de diamètre ne convient pas comme câble de secours horizontal. Parmi les liens de retenue testés, le Zorba absorbeur d'énergie et le type Miller 216 W absorbeur d'énergie donnent de bons résultats. La corde de nylon de 5/8" de diamètre et la sangle de nylon de 7/8" de largeur produisent des forces maximales d'arrêt élevées mais peuvent être utilisés moyennant certaines conditions. Le câble d'avion produit une force maximale d'arrêt très élevée et ne doit pas être utilisé. Pour les techniques d'ancrage, les câbles avec les oeillets flamands (Flemish eye splices) produisent des forces maximales d'ancrage et des forces maximales d'arrêt légèrement supérieures et des distances totales de chute plus courtes que les câbles avec les oeillets à pinces (clipped eyes). Quand le câble est attaché autour de la colonne avec des pinces Crosby, il produit des forces maximales d'ancrage inférieures mais des forces maximales d'arrêt et des distances totales de chute plus grandes que les câbles avec des oeillets flamands ou des oeillets à pinces reliés à des boulons à oeillets sur les colonnes.

La force maximale d'ancrage et la distance totale de chute les plus élevées ont lieu lorsque le point de chute de la masse est à mi-portée du câble. La force maximale d'arrêt augmente au fur et à mesure que le point de chute de la masse s'approche d'un des ancrages.

Pour deux masses, les forces maximales d'ancrage et les distances totales de chute les plus élevées se produisent lorsque le point de chute des masses se situe à mi-portée du câble. Cependant les forces maximales d'arrêt observées dans les conditions de chute de deux masses sont moins élevées que les forces maximales d'arrêt dans les conditions de chute d'une seule masse.

4.2. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DES ESSAIS D'ONTARIO HYDRO

Parmi les nombreuses recommandations d'Ontario Hydro, on retient les principales d'entre elles qui sont les suivantes :

1. Parmi les 3 câbles métalliques testés, pour la chute d'une masse de 100 kg, le câble de 1/2" de diamètre convient très bien pour arrêter la chute d'un travailleur. Avec ce câble, la force maximale d'ancrage est environ le tiers de la résistance à la rupture du câble, ce qui procure un facteur de sécurité de 3. Avec un câble de 3/8", la force maximale d'ancrage est environ la moitié de la résistance à la rupture du câble, avec un coefficient de sécurité de 2. Pour la chute de deux travailleurs, un câble de 5/8" de diamètre est requis pour arrêter la chute de deux travailleurs. Le câble de nylon de 5/8" de diamètre peut être utilisé si une grande distance totale de chute est permise. En principe, le choix d'un câble ne peut pas être fait sans une étude préalable de chaque système de câble de secours horizontal - lien de retenue.
2. Le point de chute à mi-portée produit les plus grandes forces maximales d'ancrage et les plus grandes distances totales de chute. La force maximale d'arrêt augmente lorsque le point de chute s'approche de l'ancrage. Pour la chute de deux masses, les forces maximales d'ancrage et les distances totales de chute sont supérieures lorsque le point de chute est à mi- portée. Cependant, la force d'arrêt maximale avec deux masses est inférieure à la force d'arrêt maximale avec une masse lorsque le point de chute s'approche de l'ancrage.
3. Les oeillets flamands montrent des résultats supérieurs à ceux des pinces Crosby (Crosby clips).
4. Des graphiques (ou abaques) ont été réalisés pour donner un aperçu général du comportement de câbles de secours horizontaux dans des conditions précises d'application. Une tentative pour produire un ensemble complet d'abaques permettant de concevoir un ensemble câble-lien n'a été que partiellement réalisée, parce que les paramètres à considérer pour simuler les conditions d'utilisation sur les chantiers sont trop nombreux.
5. La mesure de la flèche à 1.5 m d'un ancrage peut être utilisée comme un moyen de mesure de la tension initiale dans le câble.

4.3. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX D'ONTARIO HYDRO ET ANALYSE SIMPLIFIÉE

Les résultats expérimentaux d'Ontario Hydro confirment l'analyse simplifiée du câble de secours horizontal. Il faut retenir une force maximale dans l'ancrage de 40 kN et une force maximale d'arrêt de **10 kN** avec un câble d'acier de 1/2" de diamètre et un lien de retenue en nylon de 5/8" de diamètre. Avec l'analyse simplifiée, avec une force de 10 kN appliquée à mi-portée du câble, la force maximale d'ancrage est environ **$5.72 \times 10 = 57.2$ kN pour un angle final $\beta = 5^\circ$** . Il faut également retenir l'allongement inacceptable du câble horizontal de nylon de diamètre de 5/8".

4.4. CONCEPTION GRAPHIQUE SIMPLIFIÉE DE SYSTÈMES DE CÂBLE DE SECOURS HORIZONTAL - LIEN DE RETENUE A PARTIR DES ABAQUES D'ONTARIO HYDRO

L'ingénieur peut consulter en annexe le cheminement de principes de calculs pour concevoir un système de câble de secours horizontal - lien de retenue. Comme on peut le constater, l'analyse est complexe et vu le nombre important de paramètres à considérer, la résolution analytique des équations est quasi impossible; on doit faire appel à l'informatique pour les résoudre. Le rapport N° 83-294H de A.C Sulowski et al d'Ontario Hydro contient des abaques qui permettent de concevoir de façon graphique un système de câble de secours horizontal - lien de retenue. Ces abaques ont été réalisés à partir d'une étude théorique, puis vérifiés par un programme d'essais expérimentaux pour des types de câbles de secours et de liens de retenue qu'on utilise le plus fréquemment sur les chantiers. Cependant, ces abaques ne peuvent être utilisés que dans des conditions précises, et tout système de câble de secours horizontal - lien de retenue qui ne répond pas exactement aux conditions d'utilisation des abaques doit fait l'objet d'une étude séparée. Par conséquent, ces abaques peuvent être utilisés comme un moyen fiable de conception.

Le tableau 1 du rapport donne les conditions d'utilisation pour la conception simplifiée d'un système de câble de secours horizontal - lien de retenue. Le lecteur intéressé à utiliser les abaques de A.C Sulowski et al peut consulter une étude de cas de conception graphique d'un système de câble de secours horizontal décrit à la page 73 du rapport 83-294-H.

5. ANCRAGES DE CÂBLES DE SECOURS HORIZONTAUX

La conception des ancrages de câble de secours horizontaux est un problème complexe à cause du nombre élevé de paramètres à considérer et la diversité des ancrages utilisés sur les chantiers. L'objectif de cette section du guide n'est pas de proposer des ancrages types qu'on peut réaliser sur les chantiers, mais plutôt de proposer un cheminement et un raisonnement qui conduisent à la conception des ancrages.

La conception d'un système de Gable de secours horizontal - lien de retenue vise en premier lieu à choisir un type de câble horizontal et de lien de retenue avec ou sans absorbeur d'énergie qui, en fonction des caractéristiques du chantier, pourra arrêter la chute d'un travailleur. L'objectif visé est de minimiser la force maximale d'arrêt, de s'assurer que la force maximale d'ancrage est inférieure à la résistance à la rupture du câble de secours horizontal (Ontario Hydro recommande de limiter la force maximale d'ancrage à environ 1/3 de la résistance à la rupture du câble) et de vérifier si les ancrages auxquels sont attachés le câble de secours horizontal sont suffisamment résistants pour reprendre la force maximale d'ancrage.

La diversité des ancrages qu'on a observé sur les chantiers amène plutôt à expliciter le principe et le cheminement de calcul et les vérifications de résistance des ancrages d'après la norme CAN3-S16.1- M84.

L'ancrage type comprend, soit un élément de la structure (colonne ou poutre par exemple) auquel on attache le câble, soit un ancrage amovible composé d'un potelet ayant une base qu'on peut boulonner à la structure. Avec la diversité des ancrages utilisés, l'objectif visé est plutôt de comprendre le principe de calcul qui permet de concevoir l'ancrage.

5.1. TYPES D'ANCRAGES RENCONTRÉS SUR LES CHANTIERS

Lors des visites effectuées sur les chantiers qui font usage de câbles de secours horizontaux, on a observé trois principaux types d'ancrages :

1. Les colonnes de la structure auxquelles les deux extrémités du câble sont attachées par trois pinces;
2. Des potelets ayant une base cannelée haute d'environ 1 m, qu'on boulonne à la semelle d'une poutre maîtresse.

La section la plus utilisée pour le potelet est une HSS ayant des trous percés dans sa partie supérieure ou une plaque soudée, percée de trous. On enfle le câble dans le trou et la queue du câble est rattachée au câble

par un minimum de trois pinces.

Ces potelets, boulonnés à la semelle d'une poutre maîtresse, constituent les ancrages du câble.

3. Des potelets ayant une boucle dans laquelle le câble coulisse. Un tel potelet n'est pas l'ancrage du câble, mais sert plutôt comme gabarit de hauteur. Le câble est attaché à une membrure de la structure, et c'est cette membrure qui est l'ancrage du câble.

5.2. PRINCIPES DE CALCULS

Afin d'expliciter les principes de calculs pour la conception d'un système de câble de secours horizontal, on reproduit dans les paragraphes qui suivent un exemple de dimensionnement d'un système de câble de secours horizontal qui a été utilisé sur les chantiers de LAURALCO.

Système de câble de secours horizontal

Lien de retenue

| | | | |
|---------------------|---|---|-----------------------|
| Longueur | L | = | 1.5 m |
| Diamètre | d | = | 16 mm (5/8") |
| Aire | A | = | 201 mm ² |
| Hauteur de chute | H | = | 1.5 m |
| Module d'élasticité | E | = | 240 N/mm ² |

Câble de secours horizontal

Câble en acier

| | | | |
|---------------------|---|---|-------------------------|
| Portée | | = | 12 m |
| Diamètre | L | = | 12.7 mm (1/2") |
| Aire | A | = | 127 mm ² |
| Module d'élasticité | E | = | 64800 N/mm ² |

Installation du câble sur le chantier (Figure 7)

La flèche initiale à mi-portée est $f_1 = 250$ mm, ce qui correspond à une pente initiale de 1 : 12, soit $\alpha = 5^\circ$

Calcul de la force maximale d'arrêt F

$$F_{\max} = mg \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2EA}{mgL} H} \right] \quad (1)$$

$$\begin{aligned} F &= 100 \times 9.81 \left[1 + \sqrt{1 + \frac{(2 \times 240 \times 201 \times 1)}{(100 \times 9.81)}} \right] \\ &= 10.759 \text{ kN} \end{aligned}$$

Ou par l'abaque 1, pour $H/L = 1$, on lit:

$$F = 10.759 \text{ kN}$$

44

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{wL^2}{8f_1} \\ &= \frac{(6.42 \times 12^2)}{(8 \times 0.25)} \\ &= 462 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} s_a &= \frac{L}{2} + \frac{w^2 L^3}{48 T_1^2} & (9) \\ &= \frac{12}{2} + \frac{(6.42^2 \times 12^3)}{(48 \times 462^2)} \\ &= 6.007 \text{ m} \end{aligned}$$

Ou de l'abaque 2, avec $f_1 = 0.25$ m, on lit directement $T_1 = 462$ N.

Calcul de la force maximale d'ancrage T

$$T^2 = \frac{F^2}{4 \left(1 - \frac{(LAE)^2}{4 S_a^2 (AE + T)^2} \right)} \quad (19)$$

Soit $T = 46$ kN

$$\begin{aligned} \frac{F^2}{4 \left(1 - \frac{(LAE)^2}{4 S_a^2 (AE + T)^2} \right)} &= \frac{10.76^2}{4 \left(1 - \frac{(12 \times 127 \times 64.8)^2}{4 \times 6.007^2 (127 \times 64.8 \times 46)^2} \right)} \\ &= 2162 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T &= \sqrt{2162} \\ &= 46.2 \text{ kN} \end{aligned}$$

De l'abaque 10, on peut lire directement $F = 46.16$ kN

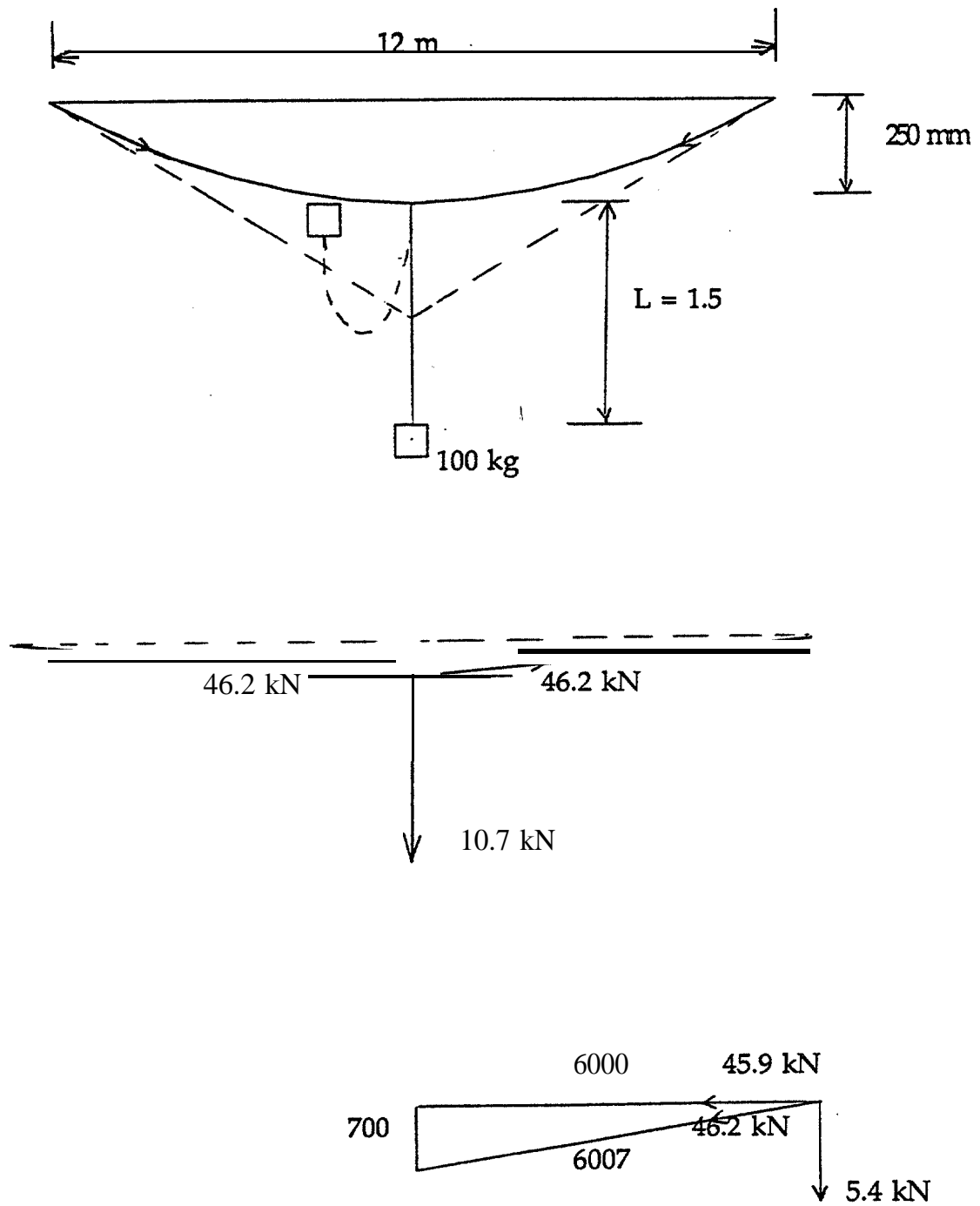
Calcul de la flèche f_2 , flèche sous l'effet de la force maximale d'ancrage

$$f_2 = \frac{wL^2}{8T} + \frac{2FL}{8T} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} f_2 &= \frac{6.42 \times 12^2 + 2 \times 10.76 \times 12 \times 1000}{8 \times 46.2 \times 1000} \\ &= 0.70 \text{ m} \end{aligned}$$

ou de l'abaque 10, on lit directement $f_2 = 0.70$ m

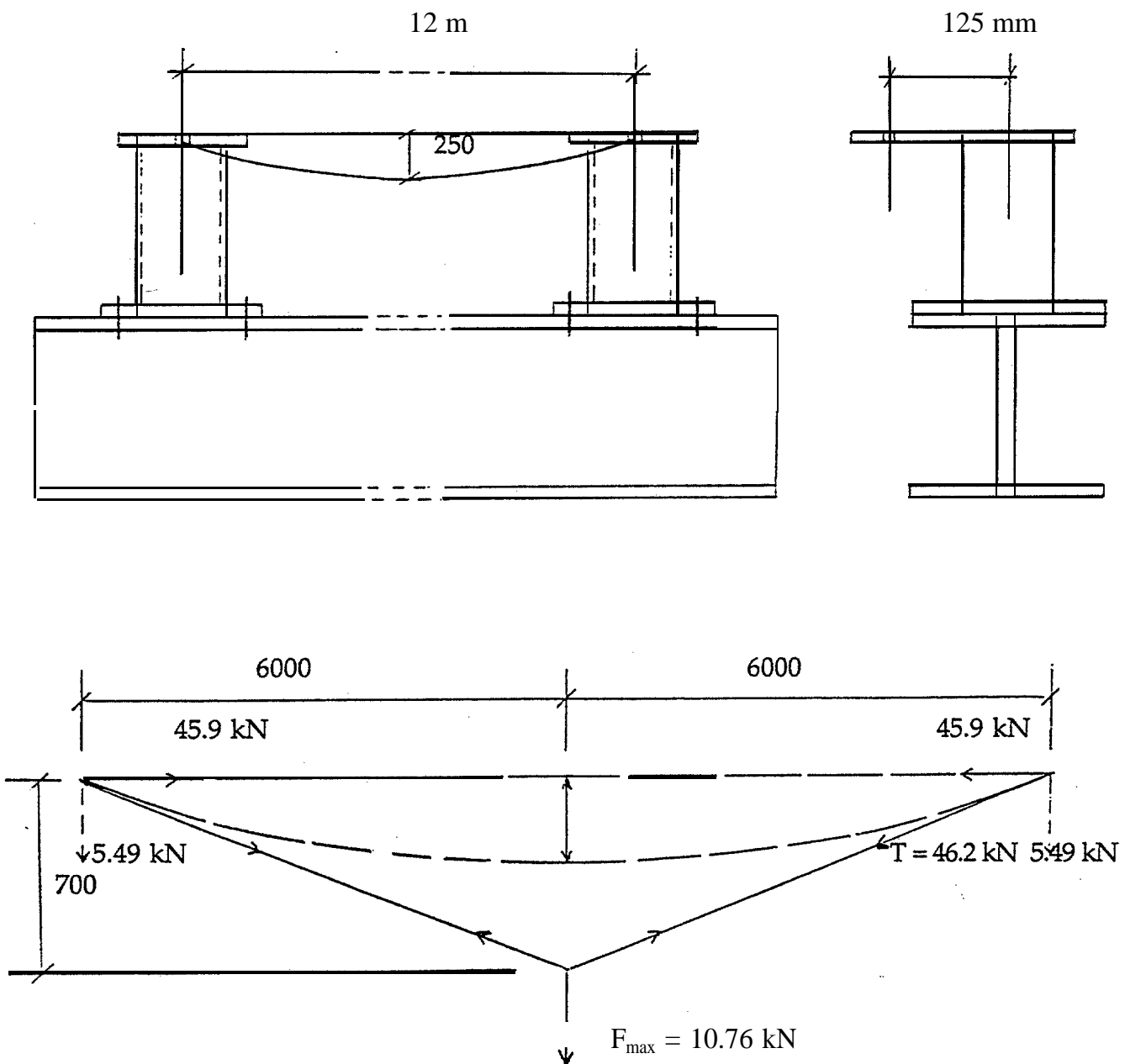
Figure 7. Installation du câble au chantier



Ancrage du système de câble

Le câble d'acier est attaché par l'intermédiaire d'un plat aux deux potelets de 0.450 m de hauteur qui sont ancrés à la semelle supérieure d'une poutre par un assemblage boulonné. Le câble est positionné à une distance de 125 mm de l'axe de la poutre afin de permettre un accès et une circulation libre le long de la semelle de la poutre.

Figure 8. Ancrage du câble sur la semelle supérieure d'une poutre de la structure



Efforts agissant à l'ancrage du câble

A partir de la figure 7, Effort horizontal = 45.9 kN
 Effort vertical = 5.4 kN

Calcul du potelet

Sollicitations réelles maximales

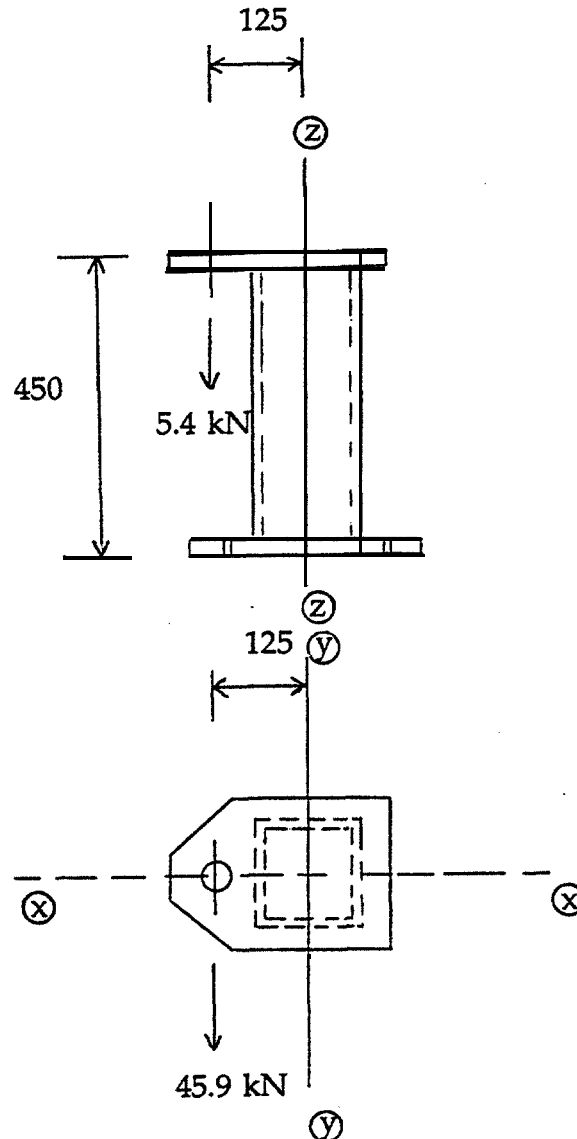
$P =$ effort axial = 5.5 kN

$V =$ effort tranchant = 45.9 kN

$M_x =$ moment fléchissant = $45.9 \times 0.45 = 20.65$ kN.m

$M_y =$ moment fléchissant = $5.4 \times 0.125 = 0.675$

$T_z =$ moment de torsion = $45.9 \times 0.125 = 5.74$ kN.m



Sollicitations maximales pondérées

D'après CAN3-S16.1-M84, le coefficient de pondération $\alpha_{LL} = 1.5$

$$P_f = 5.4 \times 1.5 = 8.1 \text{ kN}$$

$$M_{fy} = 0.675 \times 1.5 = 1.01 \text{ kN.m}$$

$$T_{fz} = 5.74 \times 1.5 = 8.6 \text{ kN.m}$$

Choix de la section pour le potelet

Soit un HSS 127 x 127 x 6.35 avec $F_y = 350 \text{ MPa}$

$$\begin{aligned} A &= 2960 \text{ mm}^2 \\ &= 132 \times 10^3 \text{ mm}^3 \\ J &= 11500 \times 10^3 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

Résistances pondérées de la section

$$M_{rx} = \phi Z F_y$$

$$M_{rx} = 0.9 \times 132 \times 10^3 \times 0.350$$

$$M_{rx} = 41.6 \text{ kN.m} > M_{fx}$$

$$M_{ry} = 41.6 \text{ kN.m} > M_{fy}$$

$$V_r = \phi A_w F_s$$

$$V_r = 0.9 \times 2 \times 127 \times 6.35 \times 0.66 \times 0.350 = 334 \text{ kN} > V_f$$

$$C_r = \phi A F_y$$

$$C_r = 0.9 \times 2960 \times 0.35 = 334 \text{ kN} > P_f$$

Combinaison de contraintes axiale et de flexion

$$\begin{aligned} \frac{P_f}{C_r} + \frac{M_{fx}}{M_{rx}} + \frac{M_{fy}}{M_{ry}} &= \frac{8.1}{932.4} + \frac{31}{41.6} + \frac{1.01}{41.6} \\ &= 0.009 + 0.745 + 0.024 \\ &= 0.778 < 1.0 \end{aligned}$$

Combinaison des contraintes de cisaillement

$$T_{fz} = 8.6 \text{ kN,m}$$

$$t = 6.35 \text{ mm}$$

$$A = (125 - 6.35)^2 = 14556 \text{ mm}^2$$

$$\tau_x = \tau_y = \frac{T_{fz}}{2 \times 14556 \times 6.35} = \frac{(8.6 \times 10^3 \times 10^3)}{2 \times 14556 \times 6.35} = 46.5 \text{ MPa}$$

$$V_{fy} = 68.9 \text{ kN}$$

$$\tau_y = \frac{(68.9 \times 10^3)}{(2 \times 127 \times 6.35)} = 42.7 \text{ MPa}$$

$$\Sigma \tau_y = 46.5 + 42.7 = 89.2 \text{ MPa}$$

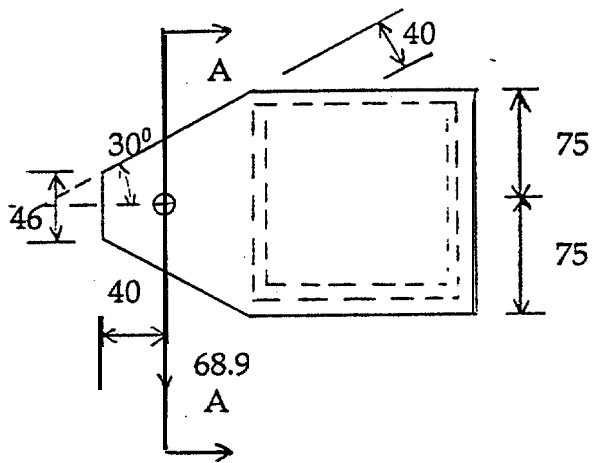
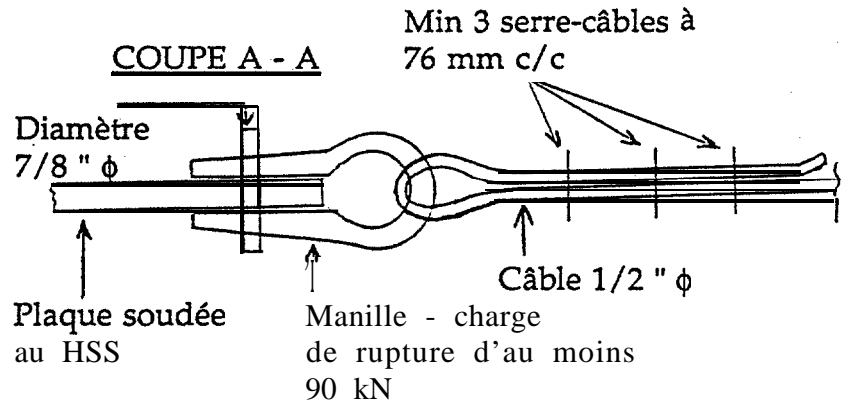
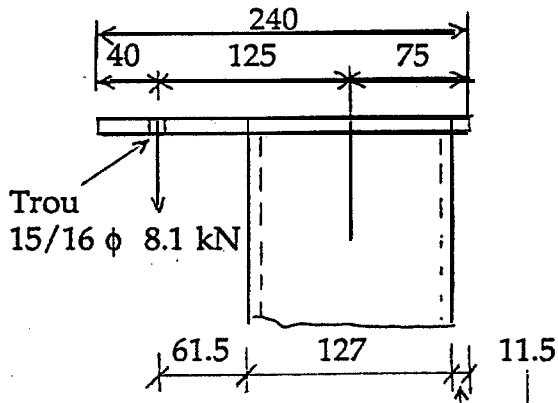
$$< \phi F_s$$

$$< 0.9 \times 0.66 \times 0.35$$

$$< 208 \text{ MPa}$$

La section HSS 127 x 127 x 6.35 est adéquate pour résister aux efforts appliqués

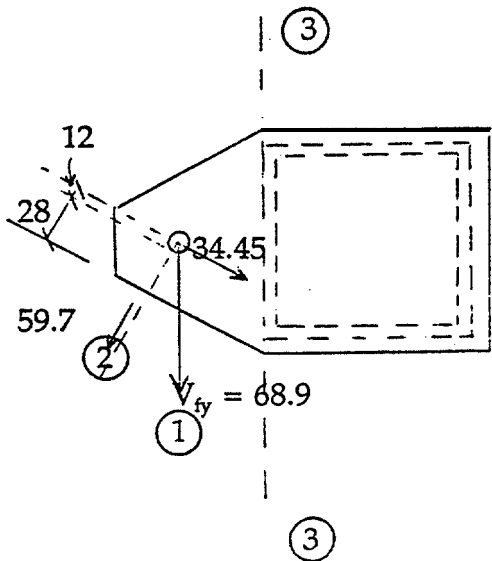
Attache du câble de secours en haut du potelet

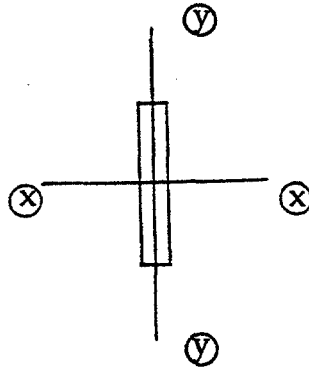


Calcul de la plaque d'attache

Soit une plaque de 16 mm d'épaisseur

$$\begin{aligned} \text{Cisaillement suivant 2} &= 28 \times 16 \times 0.9 \times 0.5 \times 0.3 \\ &= 60.5 \text{ kN} > 59.7 \end{aligned}$$



section 3-3

$$M_{fx} = 68.9 \times 61.5 = 4237 \text{ kNmm}$$

$$M_{fy} = 8.1 \times 61.5 = 498 \text{ kN.mm}$$

$$M_{rx} = \frac{16 \times 150^2 \times 0.9 \times 0.3}{4} = 24300 \text{ kN.mm}$$

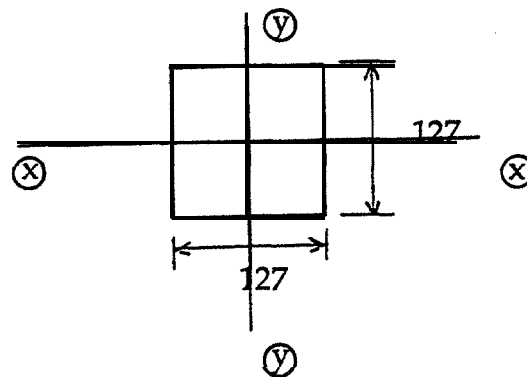
$$M_{ry} = \frac{16^2 \times 150 \times 0.9 \times 0.3}{4} = 2592 \text{ kN.mm}$$

$$\frac{M_{fx}}{M_{rx}} + \frac{M_{fy}}{M_{ry}} = \frac{4237}{24300} + \frac{498}{2582}$$

$$= 0.366 < 1.0$$

La plaque de 16 mm d'épaisseur est adéquate.

Soudure de la plaque à la section HSS



$$A = 4 \times 127 = 508 \text{ mm}^2$$

$$\begin{aligned} I_{xx} = I_{yy} &= 2(127 \times 63.5^2 + \frac{127^3}{12}) \\ &= 1365589 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$I_{zz} = 2 \times 1366689 = 2731177 \text{ mm}^4$$

Sollicitations pondérées

$$P_{fz} = 8.1 \text{ kN} \quad f_p = 8.1/508 = 0.016$$

$$V_{fv} = 68.9 \text{ kN} \quad f_v = 68.9/508 = 0.136$$

$$M_{fv} = 81 \times 125 = 1012.5 \quad f_m = (1012.5 \times 63.5)/(1365589)$$

$$f_m = 0.047$$

$$I_{fz} = 68.9 \times 125 = 8612 \quad f_t = (8612 \times 63.5)/(2731177)$$

$$f_m = 0.200$$

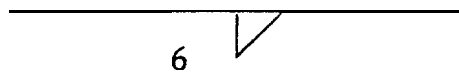
$$\text{Contrainte de cisaillement: } f_v + f_t = 0.136 + 0.2 = 0.336$$

$$\text{Contrainte axiale: } f_p + f_m = 0.016 + 0.0472 = 0.063$$

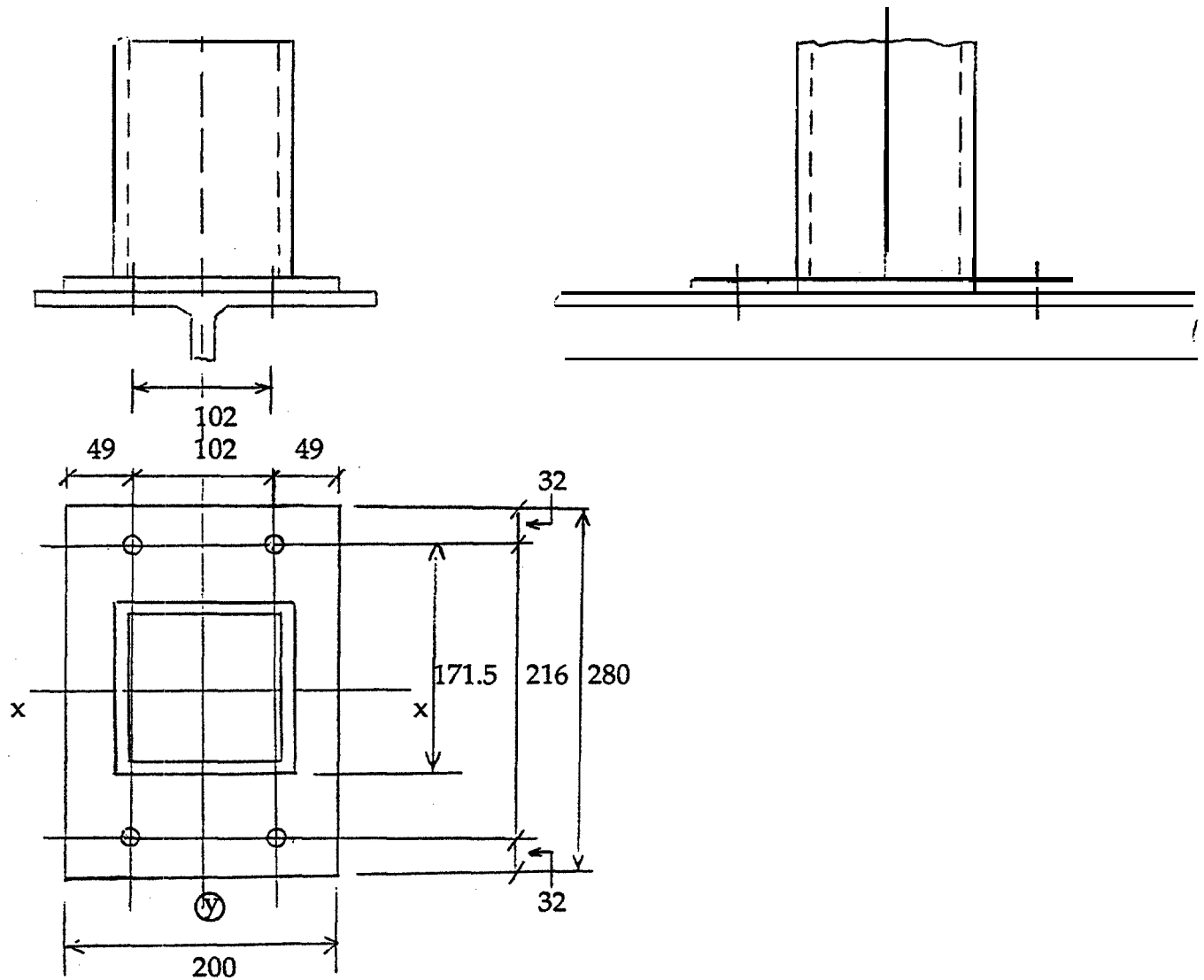
$$\text{Contrainte résultante } f_R = \sqrt{(0.336^2 + 0.063^2)}$$

$$= 0.34$$

La capacité de la soudure de 6 mm est $6 \times 0.153 = 0.918 > f_R$



Attache de la base du potelet à la semelle de la poutre



Sollicitations

$$\begin{aligned}
 P_{fz} &= 8.1 \text{ kN} \\
 V_{fy} &= 68.9 \text{ kN} \\
 M_{fx} &= 68.9 \times 0.45 = 31 \text{ kN.m} \\
 M_{fy} &= 8.1 \times 0.125 = 1.01 \text{ kN.m} \\
 T_{fz} &= 68.9 \times 0.125 = 8.6 \text{ kN.m}
 \end{aligned}$$

Calcul des boulons

$$\begin{aligned}
 I_{xx} &= 2 \times 2 \times 108^2 = 46656 \text{ mm}^2 - \text{boulons} \\
 I_{yy} &= 2 \times 2 \times 51^2 = 10404 \text{ mm}^2 - \text{boulons} \\
 I_{zz} &= 57060 \text{ mm}^2 - \text{boulons}
 \end{aligned}$$

Tension maximale dans le boulon

$$\begin{aligned}
 f_p &= -8.1 / 4 = -2.05 \text{ kN / boulon (compression)} \\
 f_{mx} &= (31 \times 10^3) / (2 \times 171.5) = 90.4 \text{ kN / boulon} \\
 f_{my} &= (1.01 \times 10^3) / (2 \times 114) = 4.4 \text{ kN / boulon} \\
 f_R &= f_p + f_{mx} + f_{my} = 92.75 \text{ kN / boulon}
 \end{aligned}$$

Pour un boulon de 3/4 " de diamètre A325,

$$T_r = 118 \text{ kN / boulon} > f_R$$

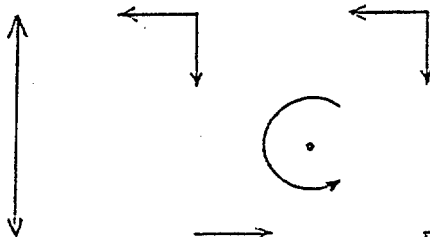
Cisaillement dans le boulon

$$\begin{aligned}
 f_{vy} &= 68.9 / 4 = 17.23 \text{ kN / boulon} \\
 f_{\tau y} &= (8.6 \times 10^3 \times 51) / 57060 = 7.69 \text{ kN / boulon} \\
 f_{\tau x} &= (8.6 \times 10^3 \times 108) / 57060 = 16.28 \text{ kN / boulon} \\
 f_{vy} + f_{\tau y} &= 17.23 + 7.69 = 24.92 \\
 f_R &= \sqrt{(24.92^2 + 16.28^2)} = 29.8 \text{ kN / boulon}
 \end{aligned}$$

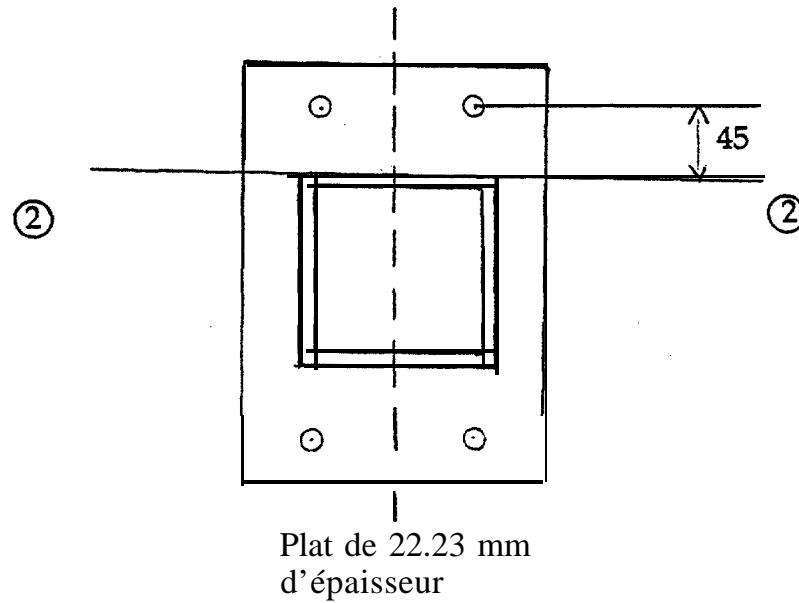
Le boulon est soumis à un effort de traction et de cisaillement. En considérant que le boulon a les filets dans le plan de cisaillement,

$$\begin{aligned}
 V_f^2 + 0.41T_f^2 &\leq 0.41T_r^2 \\
 29.8^2 + 0.41 \times 92.75^2 &= 4415 \\
 0.41 \times 118^2 &= 5709
 \end{aligned}$$

4 boulons A325 de 3/4 " de diamètre sont adéquats



Calcul de la plaque de base



$$b = 45 \text{ mm}$$

$$b' = 45 - 19.05/2 = 35.48$$

Section 2 - 2

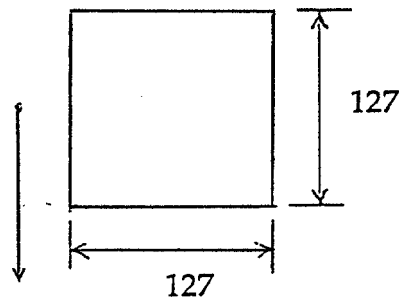
$$M_f = 2 \times 90.4 \times 35.48 = 6415 \text{ kN.mm}$$

$$M_R = 200 \times 22.23^2 \times 0.9 \times 0.30 = 6671 \text{ kN.mm}$$

La plaque de 22.23 mm convient

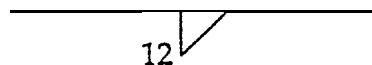
Soudure de la plaque de base au profilé HSS

$$\begin{aligned}
 P_{fy} &= 8.1 \text{ kN} \\
 V_{fy} &= 68.9 \text{ kN} \\
 M_{fx} &= 68.9 \times 0.45 = 31 \text{ kN.m} \\
 M_{fy} &= 8.1 \times 0.125 = 1.01 \text{ kN.m} \\
 T_{fz} &= 68.9 \times 0.125 = 8.6 \text{ kN.m}
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 A &= 508 \\
 I_{xx} &= I_{yy} = 1365589 \text{ mm}^4 \\
 I_p &= 2731177 \text{ mm}^4 \\
 f_p &= 8.1/508 = 0.016 \\
 f_{mx} &= (31 \times 10^3 \times 63.5)/(1365589) = 1.442 \\
 f_{my} &= (1.01 \times 10^3 \times 63.5)/(1365589) = 0.047 \\
 f_p + f_{mx} + f_{my} &= 1.505 \text{ kN / mm} \\
 f_{vy} &= 68.9 / 508 = 0.136 \downarrow \\
 f_{ry} &= (8.6 \times 10^3 \times 63.5)/2731177 = 0.200 \downarrow \\
 f_{vy} + f_{ry} &= 0.336 \\
 f_{rx} &= (8.6 \times 10^3 \times 63.5)/2731177 = 0.200 \longrightarrow \\
 f_R &= \sqrt{(0.2^2 + 0.336^2 + 1.505^2)} = 1.555 \text{ kN / mm}
 \end{aligned}$$

La résistance d'un cordon de soudure de 12 mm est 12×0.153 , soit 1.836 kN/mm



6. EXPLICATION DE L'ALINÉA (d) DU CODE DE SÉCURITÉ

Le Comité de révision du Code de sécurité pour les travaux de construction a adopté le 25 février 1988 un amendement qui permettra l'utilisation des câbles de secours horizontaux. Le texte de l'article 2.10.12 tel qu'amendé et adopté récemment à la gazette officielle du Québec est présenté au tableau 2. Le texte ainsi adopté définit trois types de points d'attache du lien de retenue:

- (a) un point fixe,
- (b) un point mobile sur une ligne verticale, et
- (c, d) un point mobile sur une ligne horizontale ou câble de secours horizontal.

L'alinéa (c) permet l'utilisation d'un câble de secours horizontal conçu par un ingénieur. L'alinéa (d) donne les caractéristiques minimales d'un câble de secours horizontal qui ne serait pas conçu par un ingénieur. La discussion qui suit explique les bases rationnelles de l'alinéa (d); elle est basée sur les résultats expérimentaux exposés à la section 4. La proposition du Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec est basée sur le compromis suivant : minimiser la distance d'arrêt de la chute pour empêcher que le travailleur ne heurte un objet sous-jacent dans sa chute et minimiser la force maximale d'arrêt. Pour minimiser la distance d'arrêt, on utilise un câble horizontal peu déformable; conséquemment, le câble de nylon 5/8" est à rejeter parce que la distance totale de chute (chute libre + arrêt) est de plus de 4 m (conditions : masse 100 kg, hauteur de chute 1.5 m, lien de retenue de 1 m en nylon 5/8", câble horizontal de 10 m et prétension de 500 N). Le câble d'acier de 1/2" de diamètre 6 x 25 IWRC grade 110/120 est acceptable à cause de sa faible déformabilité et de sa résistance.

Les essais d'Ontario Hydro ont montré que pour le câble de 1/2" de diamètre, la force maximale d'ancrage est environ le tiers de la résistance à la rupture du câble, soit un coefficient de sécurité de 3. De plus l'alinéa (d) recommande que le câble de 1/2" soit détendu selon un angle minimal de 1 vertical pour 12 horizontal, soit 5° par rapport à l'horizontal afin d'éviter des forces maximales d'ancrage trop élevées. On a vu au paragraphe 3.1 qu'une force appliquée au centre d'un câble non-pesant développe une réaction aux points d'ancrage qui augmente plus l'angle est petit.

Un angle minimal de 5° du câble par rapport à l'horizontal lors de l'installation du câble nous paraît une condition trop sécuritaire. Les essais d'Ontario Hydro sur les câbles de secours horizontaux ont tous été réalisés avec une tension initiale variant entre 0.300 kN à 6 kN dans les câbles et, par conséquent, dans certains essais, le câble était presque à l'horizontal avec l'angle α inférieur à 5°. Pourtant les forces maximales d'ancrage et les forces maximales d'arrêt observées se situaient à l'intérieur des limites permises.

On serait tenté de dire que l'angle α , égal à 5 ° minimum s'applique de la force maximale d'arrêt. Présentement on suppose qu'après application de la force maximale d'arrêt, le câble horizontal se déforme en ligne droite pour former un V. Cette hypothèse se vérifie dans la plupart des cas. Cependant, pour de très grandes portées ou lorsque le câble est pesant, le câble de secours peut toujours garder une forme curviligne (caténaire) après application de la force maximale d'arrêt.

Pour minimiser la force maximale d'arrêt, on utilise un lien de retenue conventionnel certifié CSA Z259.1 ou, mieux, un lien de retenue avec absorbeur d'énergie. Enfin, les forces mesurées aux ancrages du câble horizontal sont de l'ordre de 45 kN pour la chute de deux masses de 100 kg.

Si certaines personnes ne veulent pas considérer cet amendement, l'article 2.10.12 3)a) peut être utilisé. Il demande que le point d'attache du lien de retenue soit ancré à un élément ayant une résistance à la rupture d'au moins 18 kN. Cet élément est alors le centre du câble horizontal, qui peut être conçu pour résister à une force de 18 kN appliquée en son centre. La force F de la figure 5 est remplacée par 18 kN et il n'est pas nécessaire d'ajouter une marge de sécurité parce qu'elle est contenue dans le 18 kN.

TABLEAU 2 - ARTICLE 2.10.12 DU CODE DE SÉCURITÉ POUR LES TRAVAUX DE CONSTRUCTION DU QUÉBEC

2.10.12 CEINTURE DE SÉCURITÉ .

- 1) Le port d'une ceinture de sécurité est obligatoire si un travailleur . . .
- 2) La ceinture de sécurité doit être:
 - a) conforme à . . .
 - b) munie ...
- 3) Le point d'attache du lien de retenue doit être:
 - a) ancré à un élément ayant une résistance à la rupture d'au moins 18 kilonewtons; ou
 - b) attaché à un dispositif antichute ou à une descendeur conforme à la norme d'assurance ACNOR Z 259.2-M1979, relié à un câble de secours ou ancré à un élément ayant une résistance d'au moins 18 kilonewtons; ou
 - c) attaché à un système de câble de secours horizontal et d'ancrages conçu par un ingénieur, ainsi qu'en fait foi un plan ou une attestation disponible sur les lieux même du chantier de construction; ou
 - d) attachée à un câble de secours horizontal conforme aux normes minimales suivantes:
 - i. ce câble est un câble d'acier d'un diamètre minimum de 12 mm (1/2") relâché selon un angle minimum de 1 vertical pour 12 horizontal, soit 5° par rapport à l'horizontal;
 - ii. sa portée entre les ancrages ne peut être supérieure à 12 m;
 - iii. il est fixé à des ancrages ayant une résistance à la rupture d'au moins 90 kilonewtons;
 - iv. il ne peut être utilisé par plus de deux travailleurs à la fois.
- 4) Cependant ...
- 5) Le câble de secours . . .
- 6) Lorsqu'un travailleur . . .

7. **CONCLUSIONS ET EXEMPLES**

Le système de câble de secours horizontal - lien de retenue est couramment utilisé lorsqu'une grande mobilité et liberté de mouvement sur le plan horizontal est requis. Il représente une des meilleures méthodes de protection de chute contre les hauteurs.

Du fait que le système de câble de secours - lien de retenue met en jeu des forces considérables, il existe une certaine appréhension de la part des utilisateurs quant à son utilisation. Les alinéas 2.10.2 du code de sécurité pour les travaux de la construction explicitent les diverses conditions d'utilisation sécuritaire du câble de secours horizontal.

Dans ce manuel, on a essayé d'apporter les éléments qui, on l'espère, aideront les utilisateurs (actuels et futurs) à mieux comprendre le principe de fonctionnement d'un système de câble de secours horizontal afin qu'ils puissent l'utiliser sécuritairement aux chantiers.

Les exemples d'utilisation de système de câble de secours - lien de retenue sont nombreux au Québec. Citons entre autres les chantiers de General Motors à Bois-Briand, les alumineries dans la région de Trois-Rivières, le musée des beaux-arts et le "1000 de la Gauchetière" à Montréal.

ANNEXES

Annexe A

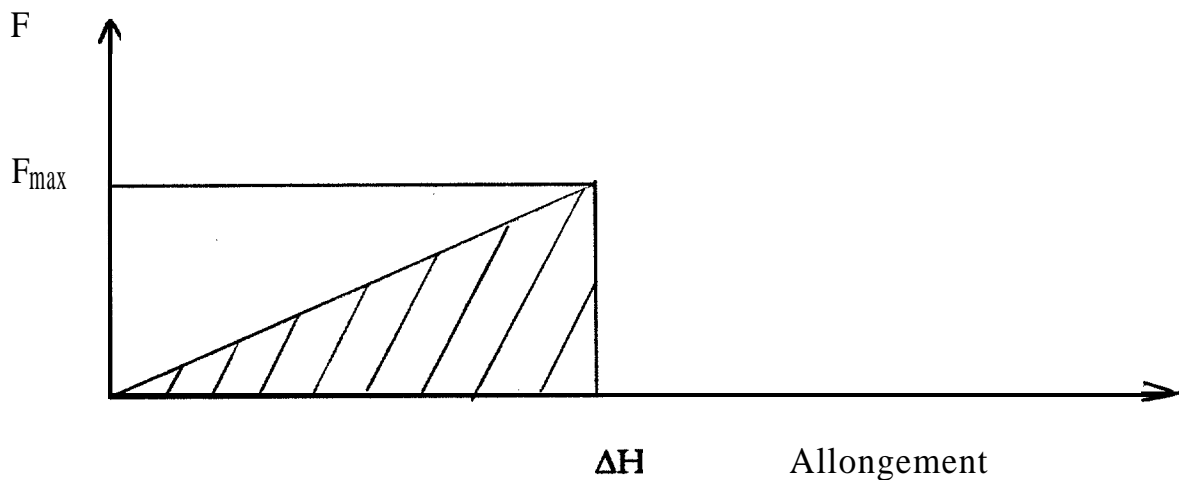
Lien de retenue à point d'ancrage fixe

1. Lien de retenue à point d'ancrage fixe

Soit une masse m , située à une hauteur de chute H par rapport à un plan BB , attachée à un point d'ancrage fixe par un lien de retenue (figure 1). Par rapport au plan BB , la masse possède de l'énergie potentielle U_p . À l'arrêt de la chute, cette énergie potentielle est dissipée en énergie de déformation dans le lien de retenue. Durant la chute, avant que la masse n'atteigne le plan BB , la tension dans le lien de retenue est zéro. Dès que la masse atteint le plan BB , la tension dans le lien croît de zéro à F_{\max} , et le lien de retenue s'allonge de ΔH jusqu'au point d'arrêt où la masse rebondit. Au point d'arrêt

$$U_{\text{def.}} = U_f$$

Comme on est dans le domaine élastique, on peut supposer que la tension dans le lien croît linéairement de zéro à F_{\max} .



Par conséquent, l'énergie de déformation

$$U_{\text{def}} = \text{aire sous la courbe Force/allongement}$$

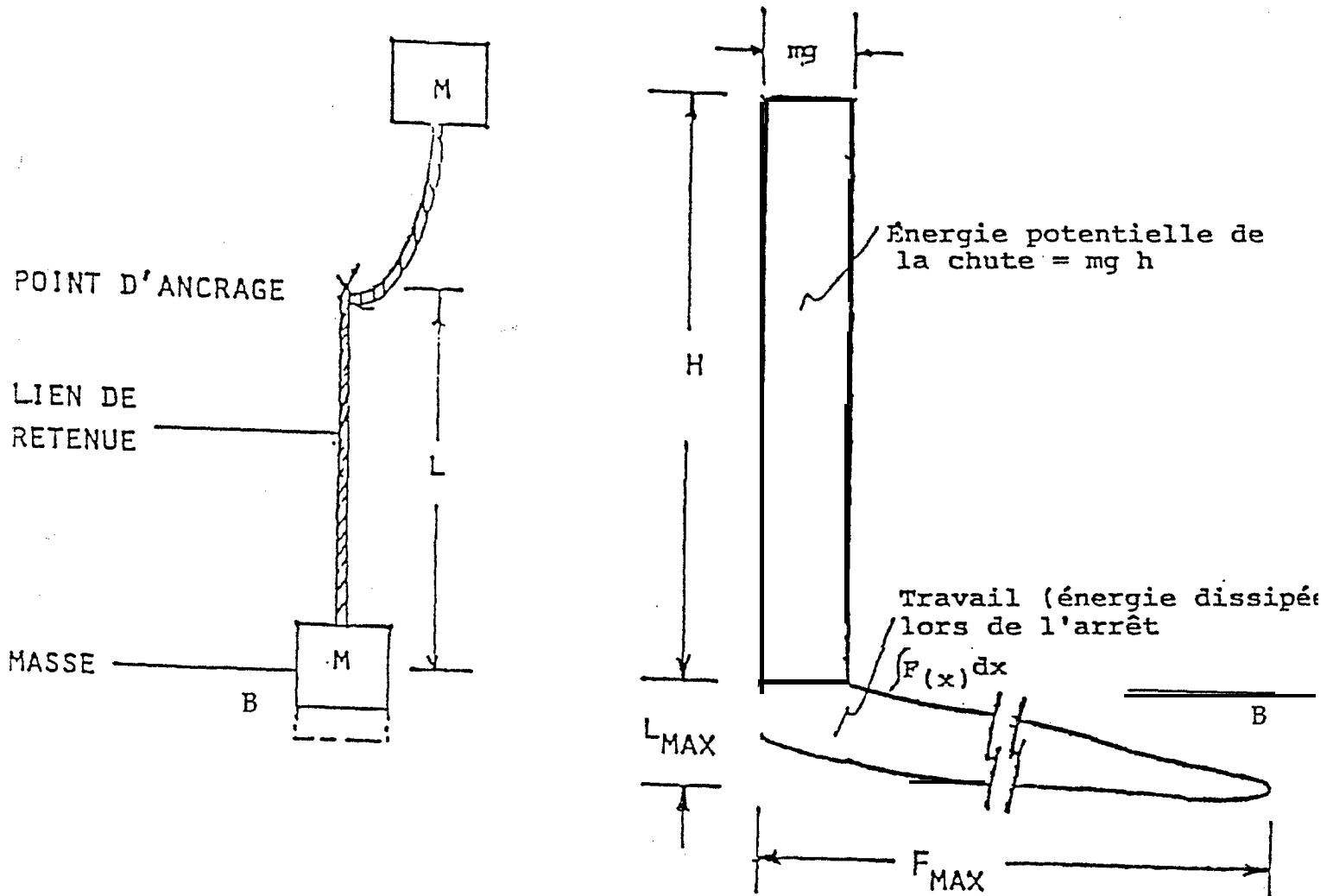
$$= \text{aire hachurée}$$

$$U_{\text{def}} = \frac{1}{2} F_{\max} \Delta H$$

$$U_p = mg (H + \Delta H)$$

$$\frac{1}{2} F_{\max} \Delta H = mg (H + \Delta H) \quad (1)$$

Figure 1 : Modèle simplifié de l'arrêt d'une chute avec un lien de retenue conventionnel



$$F_{max} = mg \left[1 + \sqrt{1 + 2 \frac{KH}{mg}} \right]$$

$$= mg \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2}{mg} \frac{EA}{L} \left(\frac{H}{L} \right)} \right]$$

m = masse

g = accélération (gravité) = 9.81 m/sec^2

$K = \frac{AE}{L}$ = constante du lien de retenue

H = Hauteur de chute

E = module d'élasticité du lien de retenue

A = Aire de la section droite du lien de retenue

L = Longueur du lien de retenue

| | | |
|------------|------------------|--|
| Notation : | m | masse, kg |
| | g | accélération de la gravité, 9.81 m/s ² |
| | A | Aire de la section du lien de retenue, mm ² |
| | E | Module d'élasticité du lien, N/mm ² |
| | H | Hauteur de la chute, m |
| | L | Longueur du lien de retenue, m |
| | F_{\max} | Force maximale d'arrêt dans le lien, kN |
| | U_{def} | Énergie de déformation, N.m |
| | U_p | Énergie potentielle, N.m |

Par définition:

$$\Delta H = \epsilon L, \text{ avec } \epsilon \text{ allongement unitaire}$$

$$\epsilon = \sigma / E \text{ (Loi de Hooke)}$$

$$\epsilon = \frac{F_{\max}}{AE} ; \quad \sigma : \text{contrainte}$$

$$\Delta H = \frac{F_{\max} L}{AE}$$

Injectant ΔH dans l'équation (1)

$$mg(H + \frac{F_{\max}}{A} \frac{L}{E}) = \frac{F_{\max}}{2} (\frac{F_{\max}}{A} \frac{L}{E})$$

On pose $K = \frac{AE}{L}$; K est la rigidité du lien de retenue

$$mg (H + \frac{F_{\max}}{K}) = \frac{F_{\max}^2}{2K}$$

$$F_{\max}^2 = 2K (mg)(H + \frac{F_{\max}}{K})$$

$$F_{\max}^2 = 2mgKH + 2mg F_{\max}$$

$$F_{\max}^2 - 2mgF_{\max} - 2mgKH = 0$$

On résout cette équation quadratique en F_{\max} .

$$F_{\max} = \frac{2mg \pm \sqrt{(4m^2g^2 + 8mgKH)}}{2}$$

$$F_{\max} = \frac{2mg \pm 2mg\sqrt{\{1 + (2KH/mg)\}}}{2}$$

$$F_{\max} = mg \left[1 + \sqrt{\left(1 + \frac{2KH}{mg}\right)} \right]$$

Avec $K = EA/L$

$$F_{\max} = mg \left[1 + \sqrt{\left(1 + \frac{2 EA H}{mg L}\right)} \right] \quad (2)$$

Comme l'illustre la formule (2), la force maximale d'arrêt dépend des paramètres suivants:

- aire A ou diamètre d de la section du lien,
- module d'élasticité du lien, E
- longueur du lien de retenue, L
- hauteur de chute, H
- masse qui chute, m

Pour étudier l'influence de ces paramètres sur la force maximale d'arrêt F_{\max} on calcule la force maximale d'arrêt avec la formule (2).

$$F_{\max} = mg \left[1 + \sqrt{\left(1 + \frac{2 EA H}{mg L}\right)} \right] \quad (2)$$

Pour illustrer l'étude, on considère un lien de retenue en nylon, couramment utilisé sur les chantiers, ayant les caractéristiques suivantes:

| | | | |
|---------------------|-----|---|---------------------|
| Diamètre | d | = | 16 mm (5/8") |
| Aire | A | = | 201 mm ² |
| Masse | --- | = | 100 kg |
| Longueur du lien | L | = | 1.5 m |
| Chute libre | H | = | 1.5 m |
| Module d'élasticité | E | = | 240 MPa |

Pour étudier l'influence d'un paramètre sur la force maximale d'arrêt, on fait varier ce paramètre en gardant les autres paramètres constant.

2. - Influence du diamètre d sur la force maximale d'arrêt du lien de retenue

Le tableau suivant illustre l'influence du diamètre d sur la force maximale d'arrêt.

| d (mm) | d (pouce) | H / L | F (kN) |
|----------|-------------|---------|----------|
| 9.53 | 3/8 | 1 | 6.86 |
| 12.7 | 1/2 | 1 | 8.77 |
| 15.88 | 5/8 | 1 | 10.76 |

On constate que F croît avec le diamètre du lien de retenue d .

3. - Influence de la masse m sur la force maximale d'arrêt

Le tableau suivant illustre l'influence de la masse m sur la force maximale d'arrêt F .

| m (kg) | H / L | F (kN) |
|----------|---------|----------|
| 100 | 1 | 10.76 |
| 110 | 1 | 11.34 |

On constate que F_{\max} croît avec la masse m , par exemple une accroissement de 0.098 kN (10 kg) de la masse augmente la force maximale d'arrêt par 0.58 kN.

4. **Influence de la longueur du lien de retenue sur la force maximale d'arrêt**

Le tableau suivant illustre l'influence de la longueur du lien de retenue L sur la force maximale d'arrêt F pour une hauteur de chute libre H de 1.5 m.

| L (m) | H / L | F (kN) |
|-------|-------|--------|
| 2 | 0.75 | 9.46 |
| 2.5 | 0.60 | 8.58 |

On constate que:

F décroît en fonction de la longueur du lien de retenue. On a intérêt à utiliser un lien de retenue le plus long possible. Cependant, L doit être tel qu'il :

permette une hauteur de travail convenable, et n'empêche ni n'entraîne de déplacement;

évite au travailleur de heurter, en tombant, le plancher ou tout matériel situé au-dessous du plancher.

Donc, il existe un compromis sur la longueur du lien de retenue L.

H_{\max} dépend aussi de L, par exemple $H_{\max} = 2L$

5. **Influence de la hauteur de chute H**

Le tableau suivant illustre l'influence de la hauteur de chute H sur la force maximale d'arrêt F.

| H (m) | H / L | F (kN) |
|-------|-------|--------|
| 2 | 1.33 | 12.26 |
| 3 | 2 | 14.78 |

On constate que la force maximale d'arrêt croît avec la hauteur de chute.

6. - Influence du module d'élasticité sur la force maximale d'arrêt

Le module d'élasticité E caractérise le type de matériau utilisé pour la retenue. Le tableau suivant illustre l'influence du module d'élasticité sur la force maximale d'arrêt F .

| Matériel | E (N/mm ²) | H / L | F (kN) |
|----------|--------------------------|-------|--------|
| Acier | 200000 | 1 | 281.97 |
| Nylon | 240 | 1 | 10.76 |

A partir des tableaux ci-dessus, il ressort que :

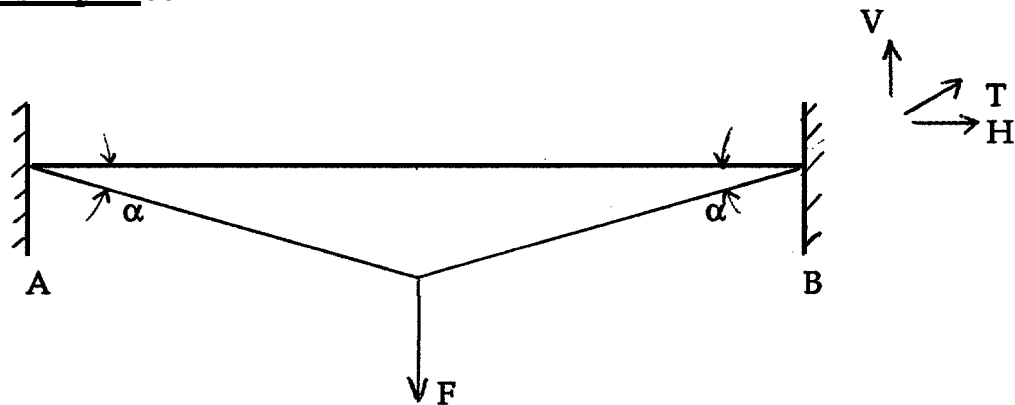
- 1° Un câble d'acier ne peut pas être utilisé seul comme lien de retenue. On utilise de préférence une matière en nylon. Si on désire utiliser de l'acier, il faut prévoir un absorbeur d'énergie.
- 2° F croît avec d (diamètre du câble). On a intérêt à choisir un diamètre convenable : $d = 5/8''$ ou $1/2''$, et de préférence $5/8''$ (pour compte de l'usure, de la déformation et des défauts d'usine).
- 3° La longueur de retenue dépend du site où le travailleur oeuvre, par exemple hauteur de plancher, matériel stocké sur le plancher, etc.

Annexe B

Câble de secours horizontal - Analyse simplifiée

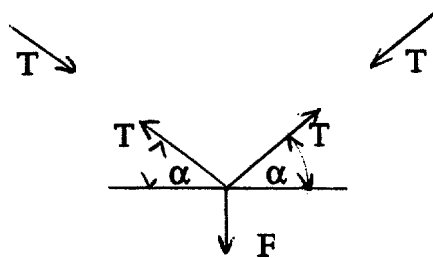
1. Câble de secours horizontal - Analyse simplifiée

Approche simplifiée



Hypothèses

1. Câble horizontal : les ancrages A et B sont au même niveau, câble non tendu, et on néglige le poids du câble.
2. La tension est uniforme dans le câble.
On dessine le schéma du corps libre au milieu du câble.



$$T \sin \alpha + T \sin \alpha = F$$

$$T = \frac{F}{2 \sin \alpha}$$

À l'ancrage B :

$$H = T \cos \alpha$$

$$H = \frac{F \cos \alpha}{2 \sin \alpha} = \frac{F}{2 \tan \alpha}$$

Tableau de $T/F = 1/(2 \sin \alpha)$ et de $H/F = 1/(2 \tan \alpha)$ en fonction de α

| Pente du câble | Angle α ° | Rapport T/F dans le câble | Rapport H/F dans l'ancrage |
|----------------|------------------|---------------------------|----------------------------|
| | 2 | 14.33 | 14.32 |
| 1:12 | 4.76 | 6.02 | 6 |
| | 5 | 5.74 | 5.72 |
| 2:12 | 9.46 | 3.04 | 3 |
| | 10 | 2.87 | 2.84 |
| 3:12 | 14.04 | 2.06 | 2 |
| | 15 | 1.93 | 1.87 |
| 4:12 | 18.43 | 1.58 | 1.5 |
| | 30 | 1 | 0.87 |

On peut comparer ce câble à une élingue renversée. On note que pour la faible valeur de $\alpha = 2^\circ$, les rapports

$$\left. \begin{array}{l} T/F = 14.33 \\ H/F = 14.32 \end{array} \right\} \text{ sont considérables.}$$

En première approche, on peut simuler le câble de secours horizontal, et remplacer la force maximale d'arrêt F_{\max} déterminée lors de l'étude du lien de retenue à point d'ancrage fixe pour obtenir un ordre de grandeur de l'importance des forces en jeu ancrages du câble horizontal.

Exemple

Une personne de masse 100 kg soumise à une force d'arrêt d'environ 10 kN produit sollicitation de 60 kN dans les ancrages pour une pente 1:12.

Annexe C

Analyse théorique d'Ontario Hydro par Sulowski et al.

1. Câble de secours horizontal

Dans l'étude théorique, les abréviations suivantes sont utilisées :

| | |
|-------------|--|
| HLL | Horizontal lifeline - Câble de secours horizontal |
| FAS | Fall arresting system - Système d'arrêt de chute |
| MAF | Maximum arresting force - Force maximale d'arrêt |
| MAL | Maximum anchorage load - Force maximale d'ancrage |
| TFD | Total fall distance - Distance totale de chute |
| FFD | Free fall distance - Distance de chute libre |
| MC | Minimum clearance - Dégagement minimum |
| m | Falling mass Masse qui chute |
| g | Gravitational acceleration - accélération de la gravité |
| E | Modulus of elasticity - Module d'élasticité |
| IWRC | Independent wire rope core |
| SA | Shock absorber - Absorbeur d'énergie |
| FLS | Length of lanyard in the FAS - Longueur du lien de retenue |

2. Analyse théorique

2.1. Analyse caténaire

Soit un câble de secours ancré à ses deux extrémités sur le même plan horizontal (voir Figure 1). Sous l'effet du poids propre et de la tension initiale, le câble prend une forme curviligne qu'on peut approcher par l'équation caténaire à l'application d'une charge dynamique. L'équation caténaire s'exprime par les deux équations suivantes :

$$y = c \operatorname{ch} (x/c) \quad (1)$$

$$\operatorname{ch} t = \frac{1}{2} (e^t + e^{-t})$$

$$s = c \operatorname{sh} (x/c) \quad (2)$$

$$\operatorname{sh} t = \frac{1}{2} (e^t - e^{-t})$$

s : longueur du demi-arc du câble

c : paramètre du câble

x, y : coordonnées rectangulaires (abscisse et ordonnée) (Figure 1).

La relation (1) exprime l'ordonnée y en fonction de l'abscisse x ; la relation (2) exprime l'abscisse curviligne en fonction de l'abscisse x . On définit le paramètre caractéristique de la caténaire comme suit :

$$c = \frac{T_0}{w} \quad (3)$$

T_0 : tension du câble au bas de la caténaire (N)

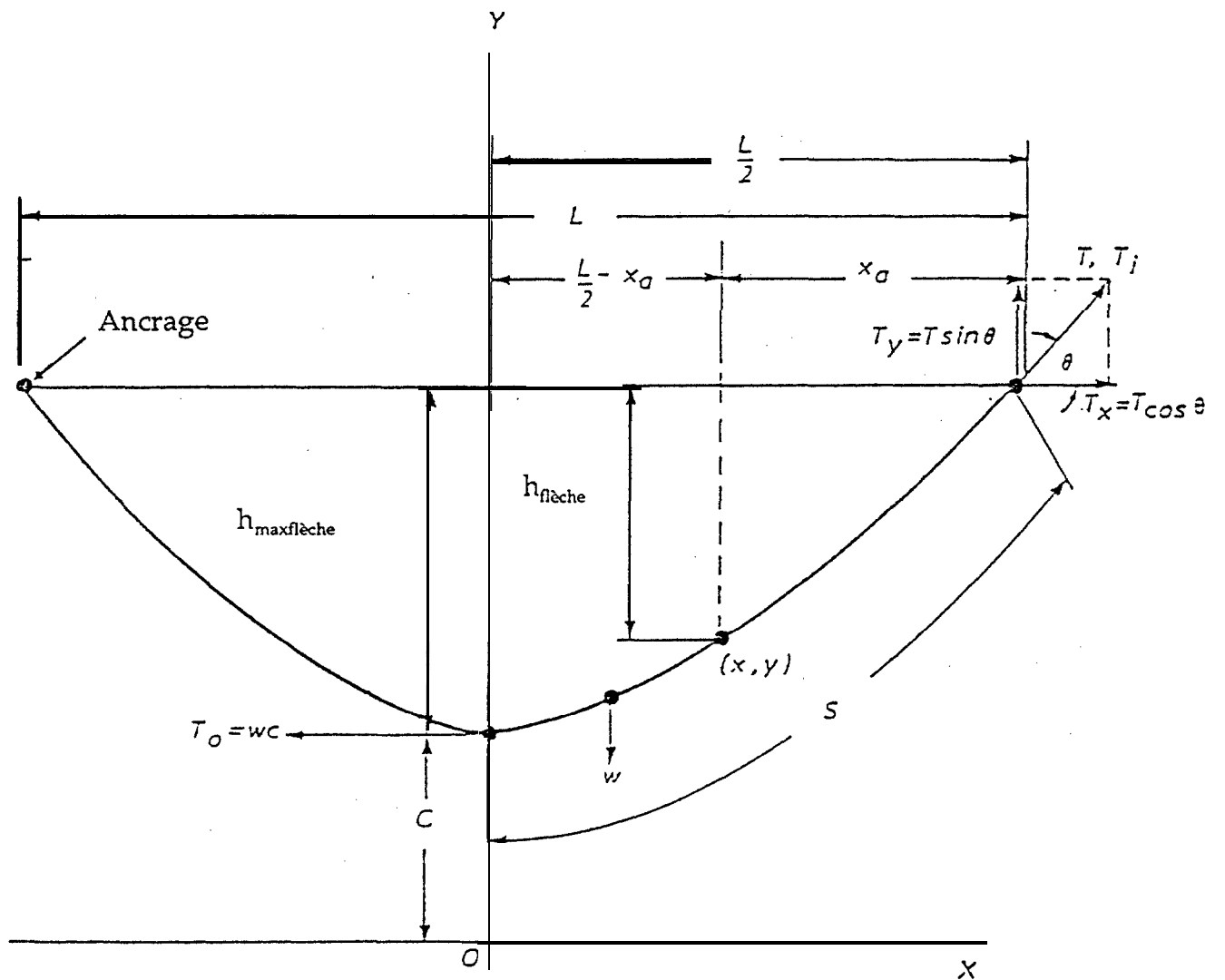
w : poids au mètre linéaire du câble (N/m)

Les équations 1,2,3, permettent de déterminer les paramètres suivants :

. La tension du câble à l'ancrage;

. La flèche maximale au centre du câble $h_{\max \text{flèche}}$

Figure 1. Notation utilisée pour l'équation caténaire



A l'ancrage:

$$T_x = T \cos \theta \quad (4)$$

$$T_y = T \sin \theta \quad (5)$$

T : Tension dans le câble

θ : Angle de la fibre moyenne du câble à l'ancrage par rapport à l'horizontale en degrés.

D'autre part :

$$T_x = T \quad (6)$$

$$\text{ou } T = WC = T \cos \theta \quad (7)$$

Par la statique, la composante verticale de T , l'ancrage, est égale à la moitié du poids total du câble.

$$T_y = ws \quad (8)$$

$$\text{ou } T \sin \theta = ws \quad (9)$$

Des équations (7) et (9)

$$T \sin \theta = ws$$

$$T \cos \theta = wc$$

$$\tan \theta = \frac{s}{c} \quad (10)$$

Des équations (2) et (10)

$$\theta = \tan^{-1} \frac{s}{c}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\sinh \frac{L}{2c} \right) \quad (11)$$

$$x = \frac{L}{2} \text{ à l'ancrage}$$

L : portée du câble horizontal

En injectant cette valeur de θ dans l'équation (7)

$$T = \frac{wc}{\cos\theta} = \frac{T_0}{\cos\theta}$$

À l'ancrage, $x = L / 2$; la tension T dans le câble est donnée par

$$T = \frac{T_c}{\cos \left[\tan^{-1} \left(\sinh \frac{L}{2c} \right) \right]} \quad (12)$$

L'ordonnée y_a à une distance x_a de l'ancrage est calculée à partir de l'équation (1) (voir Fig 1).

$$y_a = \frac{c \cosh(L/2 - x_a)}{2} \quad (13)$$

et à l'ancrage

$$y_c = c \cosh \frac{L}{2c} \quad (14)$$

La flèche à x_a est obtenue en soustrayant l'équation (13) de l'équation (14)

$$\begin{aligned} h_{\text{flèche}} &= y_c - y_a \\ &= c \left[\cosh \frac{L}{2c} - \cosh \frac{(L/2 - x_a)}{c} \right] \end{aligned}$$

La flèche maximale a lieu au centre $x = L/2$

$$\begin{aligned} h_{\text{max flèche}} &= y_c - c \\ &= c \left(\cosh \frac{L}{2c} - 1 \right) \end{aligned}$$

Pour déterminer le paramètre c de l'équation caténaire, on utilise une méthode itérative. On débute l'itération en partant de l'équation (3) en supposant tension initiale T égale à T_0 à partir de laquelle on calcule c . De cette valeur de c , on calcule la tension T à partir de l'équation (12) et on compare T jusqu'à ce que la tension calculée T par l'équation (12) soit à 1 % près de tension T_0 . A chaque itération, on ajuste la valeur précédente de T par la différence $T - T_0$.

$$c = \frac{L}{w} \quad (3)$$

Comme l'analyse caténaire implique une méthode itérative, Ontario Hydro a développé un programme informatique pour calculer les flèches de différents systèmes de câbles de secours horizontaux qu'ils comparent par les flèches mesurées lors d'un programme d'essais. Les figures 2 et 3 illustrent les résultats.

Figure 2. Flèche à mi-portée pour un câble métallique de 12.7 mm (1/2") de diamètre

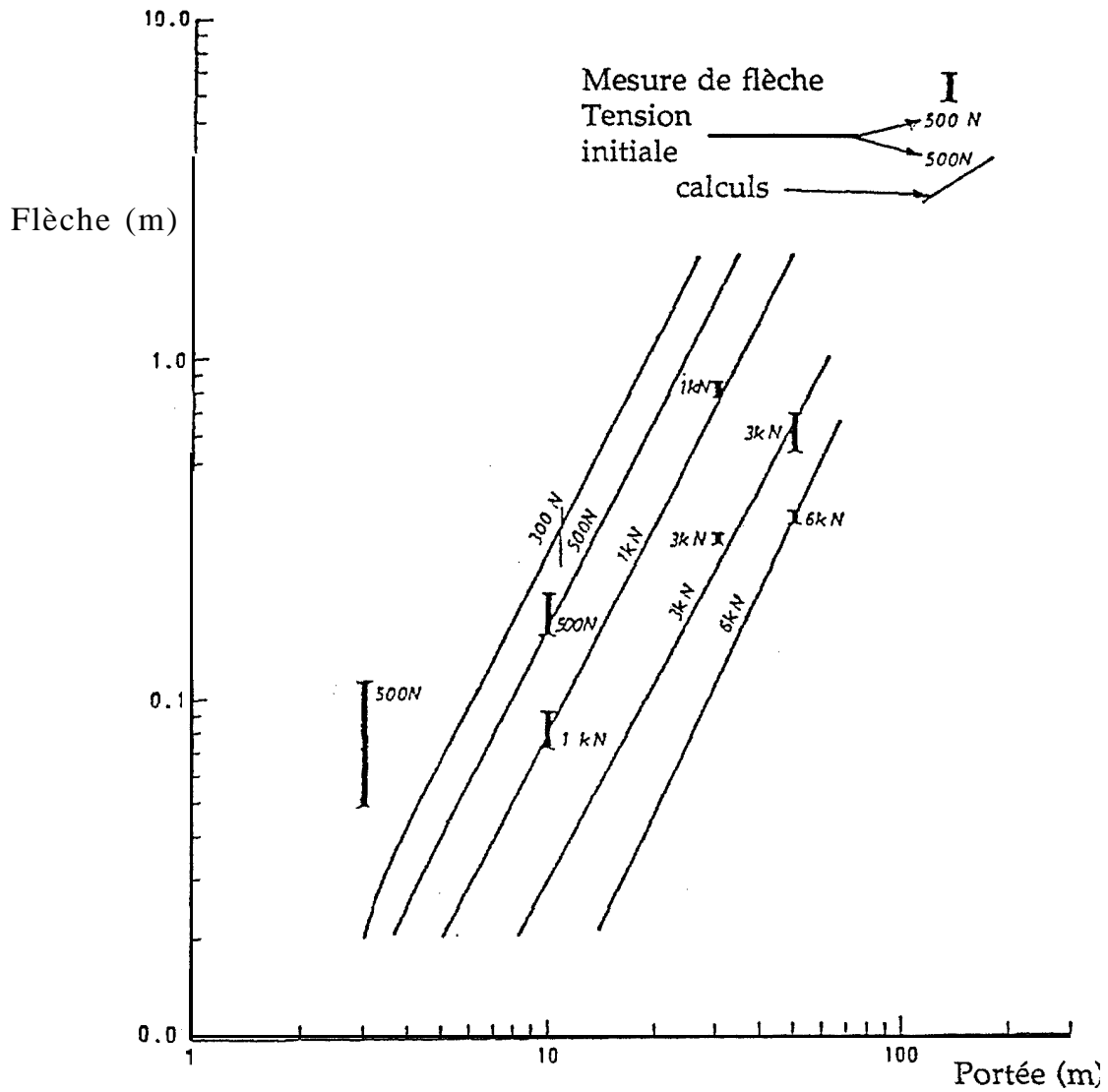
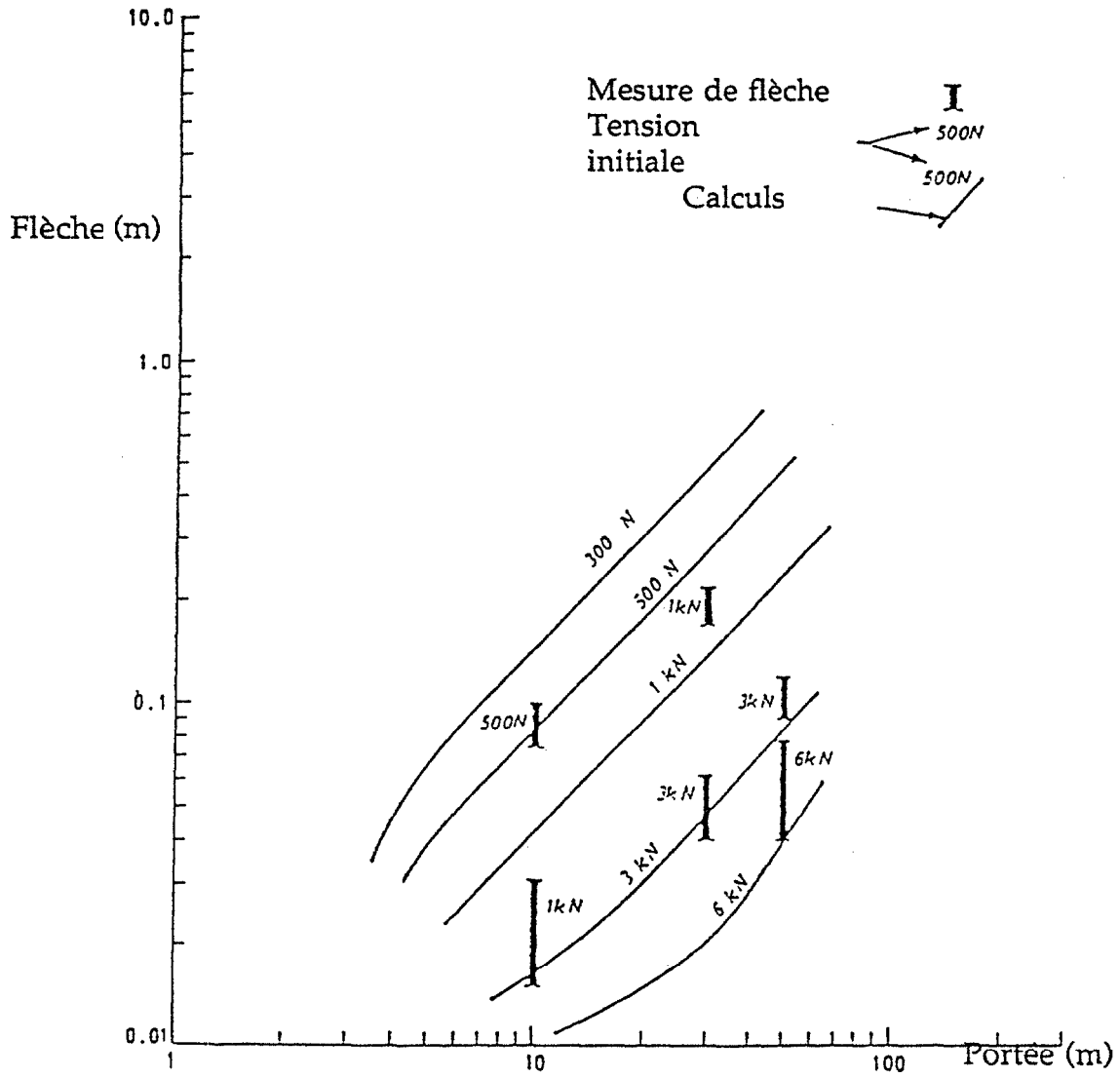


Figure 3. Flèche à 1.5 m de l'ancrage pour un câble métallique de 12.7 mm (1/2 de diamètre)



2.2. Principe énergétique

2.2.1. Énergie potentielle

L'énergie potentielle d'une masse à une hauteur de chute h est donnée par la relation suivante :

$$U_P = mgh \quad (18)$$

2.2.2. Énergie de déformation

L'énergie de déformation est donnée par la relation suivante:

Pour 1 élément :

$$U_e = (1/2)P\delta \quad (21)$$

ou pour un système à n éléments :

$$U_e = \sum_{i=1}^n (1/2) P_i \delta_i$$

Pour un câble

$$\delta = \epsilon L, \epsilon \text{ allongement unitaire}$$

$$\text{Loi de Hooke} \quad \epsilon = \sigma/E$$

$$\delta = \sigma L/E = PL/AE \quad (22)$$

$$\delta = P/K \quad (23)$$

$$K = \frac{AE}{L}, \text{ constante de rigidité}$$

En injectant δ de l'équation 22 dans l'équation (21)

$$U_e = \frac{1}{2} (P PL) / AE = \frac{1}{2} (P^2 L / AE)$$

Avec:

- U_p : énergie potentielle (N.m)
 U_e : énergie de déformation (N.m)
 U_i : énergie interne, (N.m)
 m : masse (kg)
 g : accélération de la gravité, 9.81 m/s^2
 h : distance de chute de la masse (m)
 P : charge appliquée (N)
 δ : déformation du câble (m)
 ϵ : déformation unitaire
 L : longueur originale du câble (m)
 A : aire du câble (m^2)
 E : module d'élasticité du câble (MPa)
 K : constante de rigidité = AE / L (N/m)
 P_i : force appliquée à chaque câble (N)
 δ_i : déformation de chaque câble (m).

2.2.3. Principe de la conservation de l'énergie

D'après le principe de la conservation de l'énergie, l'énergie total d'un système lors d'une transformation se conserve.

$$U_t = U_p + U_e + U_i = \text{constante}$$

3. Système de câble de secours horizontal - lien de retenue

3.1. Lien de retenue sans absorbeur d'énergie - équations énergétiques

Soit une masse m située à une hauteur de chute h , attachée par un lien de retenue à un câble de secours ancré à ses deux extrémités sur le même plan horizontal (figure 4). Avant la chute de la masse, les forces dans le système câble -lien sont nulles. Suite à la chute de la masse les forces dans le système câble lien croissent de zéro à leur valeur maximale au point d'arrêt de la chute avant que la masse rebondisse. Au point d'arrêt de la chute, l'équilibre du système est quasi-statique et on peut écrire les équations de la statique. Suite à l'arrêt de la chute, l'énergie totale de la masse sous forme d'énergie potentielle est dissipée en énergie de déformation dans le système de câble de secours - lien, et par conséquent $U_p = U_e$, soit :

$$mgh = \sum_{i=1} (1/2) P_i \delta_i \quad (20)$$

Pour le système de câble de secours horizontal - lien (HLL) au point d'arrêt de la chute, avant que la masse ne rebondisse :

$$U_e = \frac{1}{2} \left(\frac{P_a^2 S_a}{A_1 E_1} + \frac{P_b^2 S_b}{A_2 E_2} + \frac{P^2 S_c}{A_2 E_2} \right) \quad (24)$$

P_a : tension, côté A du HLL (N)

P_b : tension, côté B du HLL (N)

P : tension dans le lien de retenue (FAS) (N)

S_a : longueur originale du côté A du HLL (m)

S_b : longueur originale du côté B du HLL (m)

S_c : longueur originale du lien de retenue (FAS) (m)

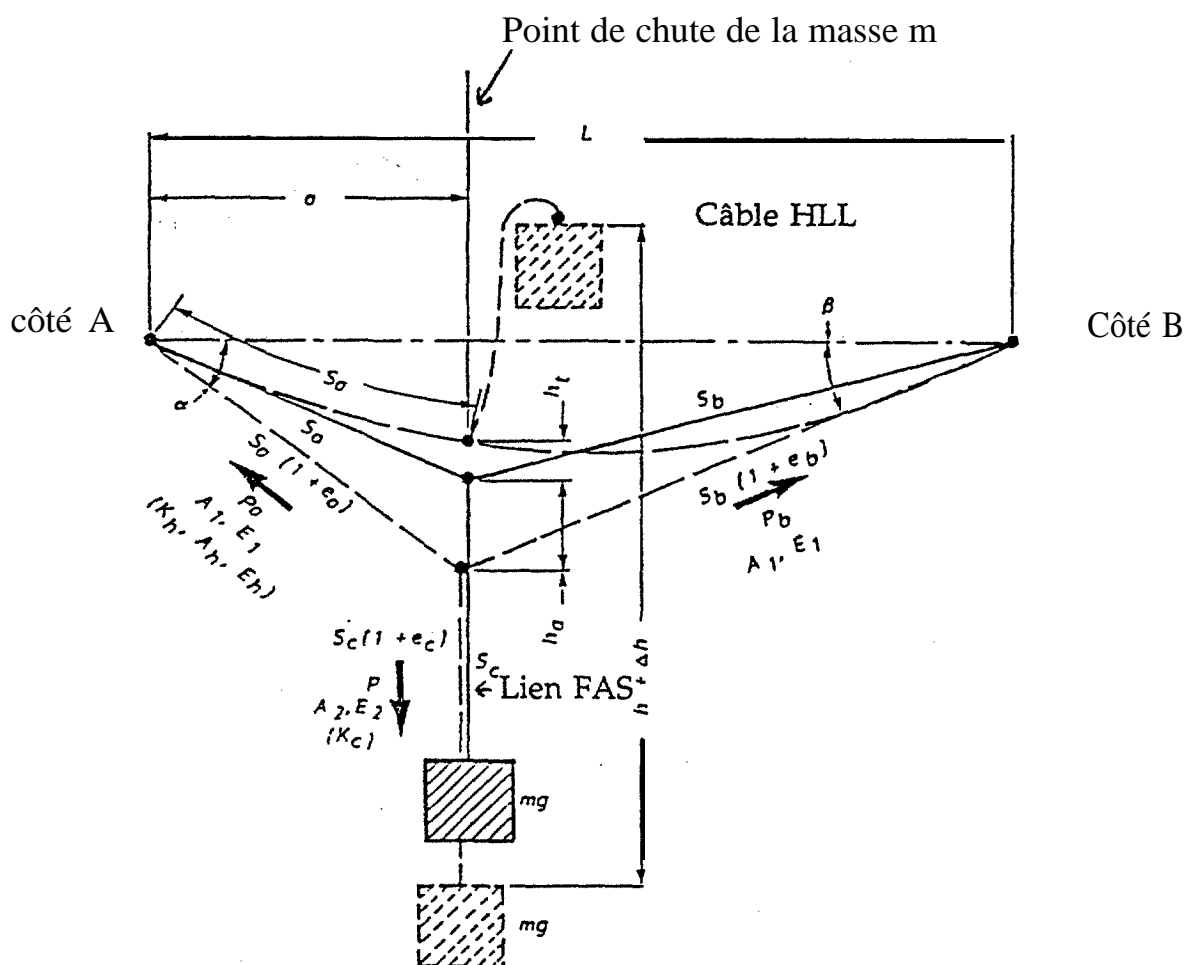
A_1 : aire du câble de secours (HLL) (mm^2)

A_2 : aire du lien de retenue (FAS) (mm^2)

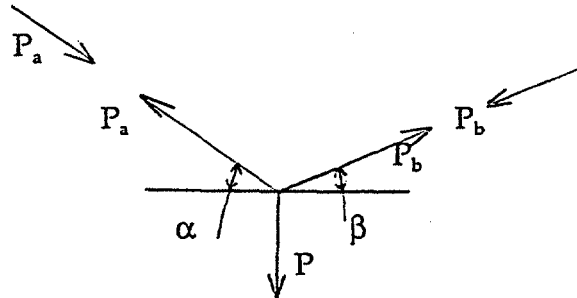
E_1 : module d'élasticité du HLL (MPa)

E_2 : module d'élasticité du FAS (MPa)

Figure 4. Notations pour les équations énergétiques



Le schéma du corps libre est le suivant:



En écrivant l'équilibre

$$P_a \cos \alpha = P_b \cos \beta; \quad P_b = P_a \frac{\cos \alpha}{\cos \beta}$$

$$P_a \sin \alpha + P_b \sin \beta = P$$

$$P_a \sin \alpha + P_a \frac{\cos \alpha \sin \beta}{\cos \beta} = P$$

$$P_a (\sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \beta) = P \cos \beta$$

$$P_a = P \cos \beta / \sin(\alpha + \beta) \quad (25)$$

$$P_b = P \cos \alpha / \sin(\alpha + \beta) \quad (26)$$

α = angle vers le bas du côté A du HLL par rapport à l'horizontale en degrés

β = angle vers le bas du côté B du HLL par rapport à l'horizontale en degrés

Les composantes du côté droit de l'équation (24) sont connues sauf P, P_a , P_b . Par conséquent

$$U_e = U_e(\alpha, \beta, P) \quad (27)$$

L'énergie potentielle de la masse m est

$$U_p = mg(h + \Delta h) \quad (28)$$

Δh : distance de chute additionnelle due à l'élongation du lien d retenue et du câble de secours horizontal (m)

Dans l'équation (28), m , h , g sont connus, sauf Δh .

$$\Delta h = h_t + h_a + h_c$$

h_t : flèche due au changement de forme du HLL de la form caténaire à la forme triangulaire (m)

h_a : flèche due à l'allongement du HLL (m)

h_c : flèche due à l'allongement du FAS (m)

$$\begin{aligned} (h_s + h_t + h_a)^2 &= S_a^2 (1 + e_a)^2 - a^2 \\ (h_t + h_a) &= \sqrt{S_a^2 (1 + e_a)^2 - a^2} - h_s \end{aligned} \quad (30)$$

e_a : allongement de S_u à la force P_a (m)

a : abscisse du point de chute à partir de l'ancrage A.

h_s : flèche initiale du HLL à l'abscisse a (m)

$$e_a = \frac{P_a}{A_1 E_1} \quad (31)$$

$$\text{ou } e_a = \frac{P_a}{K_h L} \quad (32)$$

K_h : rigidité du câble en entier (N/m)

L : longueur totale du câble (m)

$$h_c = S_c e_c \quad (33)$$

$$e_c = \frac{P}{A_2 E_2} = \frac{P}{K_c L_c} \quad (34)$$

K_c : constante de rigidité du lien de retenue FAS (N/m)

L_c : longueur totale du FAS (m)

$$P_a = P_a(P, \alpha, \beta), \text{ ceci implique } \Delta h = \Delta h(P, \alpha, \beta) \quad (35)$$

$$U_p = mg \{ h + \Delta h(P, \alpha, \beta) \} \quad (36)$$

En substituant les équations (27) et (36) dans $U_p = U_e$

$$mg \{ h + \Delta h(P, \alpha, \beta) \} = U_e(P, \alpha, \beta) \quad (37)$$

$$mg = \frac{U_e(P, \alpha, \beta)}{\{ h + \Delta h(P, \alpha, \beta) \}} \quad (38)$$

Les deux inconnues α, β sont déterminées à partir de la géométrie

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{[L^2 + S_a^2(1+e_a)^2 - S_b^2(1+e_b)^2]}{2S_a(1+e_a)L} \quad (39)$$

$$\beta = \cos^{-1} \frac{[L^2 + S_b^2(1+e_b)^2 - S_a^2(1+e_a)^2]}{2S_b(1+e_b)L} \quad (40)$$

L : portée du câble (m)

$$e_a = P_a / A_1 E_1 = P_a / K_h L \quad (41)$$

$$e_b = P_b / A_1 E_1 = P_b / K_h L$$

$$P_a : P_a[P, \alpha, \beta] \quad (43)$$

$$P_b : P_b[P, \alpha, \beta] \quad (44)$$

Pour résoudre l'équation (38) et pour obtenir P, α, β , on utilise une méthode itérative. La quantité mg étant connue, on utilise un triplet (P, α, β) et on itère et on compare le rapport $U_e(P, \alpha, \beta) / \{ h + \Delta h(P, \alpha, \beta) \}$ à mg .

4. Constante de rigidité des HLL et FAS

Le câble horizontal utilisé pour les essais comprend des cellules de charge, des tendeurs, des portions de câble jointes bout à bout et le câble lui-même. Pour calculer la rigidité de cet ensemble, on utilise l'équation suivante :

$$K_h = 1 / \sum_{i=1} (L_i / A_i E_i) \quad (45)$$

K_h : constante de rigidité pour la longueur totale du câble (N/m)

A_i : aire de la portion i du HLL (m^2)

E_i : module d'élasticité de la portion i du câble (MPa)

L_i : longueur de la portion i du HLL (m)

La constante de rigidité K est prise pour le câble entier. Dans le programme informatique, on a utilisé la constante de rigidité par unité de longueur.

$$K_u = K_h / L_h = A_h E_h \quad (46)$$

K_u : constante de rigidité par unité de longueur (N/m/m)

S_h : longueur du HLL (m)

A_h : aire moyenne du câble entier HLL (m^2)

E_h : module apparent d'élasticité du câble entier MPa.

On effectue les mêmes calculs pour le lien de retenue.

5. Lien de retenue avec absorbeur d'énergie

La présence d'un absorbeur d'énergie ne modifie pas le schéma de calcul. Dans l'équation (37) l'énergie de déformation $U_e (P, \alpha, \beta)$ devient

$$U_e = U_e (P_t, \alpha, \beta) + P_e \times h_e$$

P_t : la force qui active l'absorbeur d'énergie (N)

P_e : la force sous laquelle l'absorbeur d'énergie s'allonge (N)

h_e : allongement de l'absorbeur d'énergie $P(m)$

D'après l'équation 36, l'énergie potentielle $U_p(P, \alpha, \beta)$ devient

$$U_p = mg \{h + dh (P_e, \alpha, \beta) + h_e\}$$

Par conséquent l'équation (37) exprimant la conservation de l'énergie devient la suivante :

$$mg (h + dh (P_e, \alpha, \beta) + h_e) = U_e (P_t, \alpha, \beta) + P_e \times h_e$$

soit

$$mg = \frac{\{U_e (P_t, \alpha, \beta) + P_e * h_e\}}{\{h + dh (P_e, \alpha, \beta) + h_e\}}$$

Dans l'équation ci-dessus, les paramètres α , β , h_e sont inconnus. P_t et P_e sont les caractéristiques de l'absorbeur d'énergie et sont donc connues. On résout cette équation suivant la même méthode itérative décrite précédemment.

Lorsque l'énergie potentielle ne peut pas être dissipée complètement par la déformation de l'absorbeur d'énergie, l'équation ci-dessus doit être modifiée suivant cette équation :

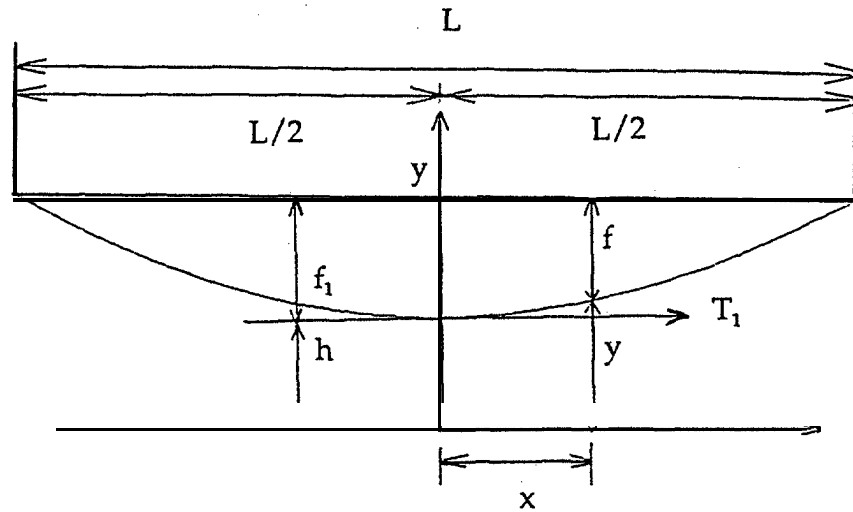
$$mg = \frac{\{U_e (P_t, \alpha, \beta) + P_e * h_{e\max}\}}{\{h + dh (p_e, \alpha, \beta) + h_{e\max}\}}$$

Ou $h_{e\max}$: l'allongement maximal de l'absorbeur d'énergie en m.

Annexe D

Abaques déroulant de l'analyse parabolique du câble de secours horizontal et de l'article 2.10.2.3 du code de sécurité pour les travaux de construction du Québec

1. Analyse parabolique



Les formules découlant de l'analyse parabolique sont simples et faciles à utiliser. Pour une charge verticale uniformément répartie w N/m le long du câble, la déformée y , à l'abscisse x du câble est donnée par l'équation différentielle linéaire du deuxième ordre:

$$T_1 y'' = w$$

$$y'' = \frac{d^2 y}{dx^2}$$

T_1 : composante horizontale de la tension T dans le câble (N)

$$T_1 y'' = w \quad (1)$$

w : poids unitaire du câble N/m

En intégrant l'équation (1)

$$T_1 y' = wx + c$$

À $x = 0$, $y' = 0$, et donc $c = 0$

$$T_1 y' = wx \quad (2)$$

Intégrant l'équation (2)

$$T_1 y = \frac{wx^2}{2} + c_1 \quad (3)$$

$$\text{À } x = 0, y = h$$

$$T_1 h = c_1$$

$$c_1 = T_1 h$$

l'équation (3) devient

$$T_1 y = \frac{wx^2}{2} + T_1 h \quad (4)$$

$$y = \frac{wx^2}{2T_1} + h \quad (5)$$

h : ordonnée à mi-portée, dépend de la tension initiale T

f_1 : flèche par rapport à la ligne horizontale passant par les deux ancrages, à mi-portée

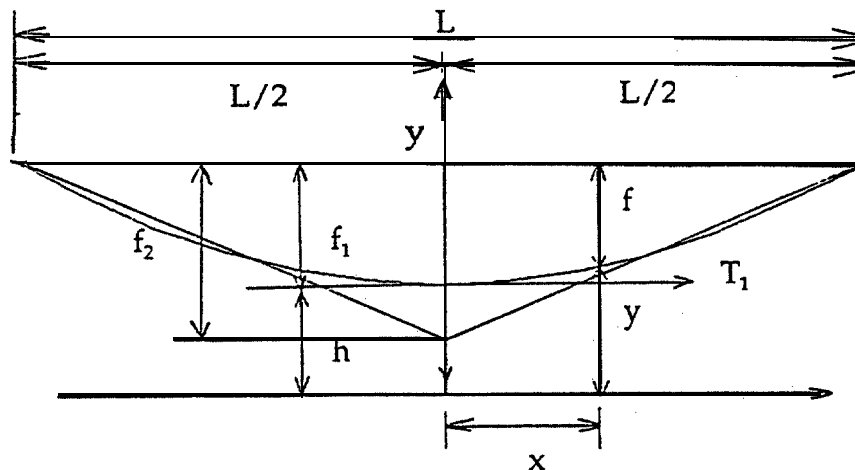
$$\text{À } x = L/2, y = h + f_1$$

$$h + f_1 = [w(L/2)^2 / 2T_1] + h$$

d'où:

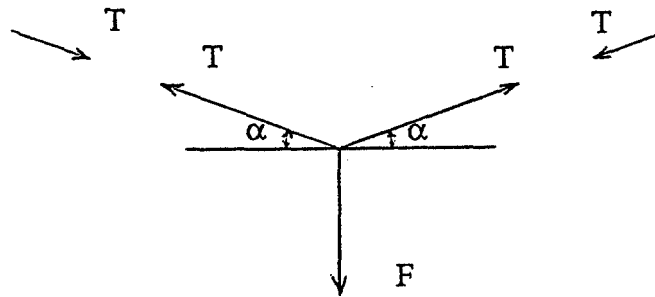
$$f_1 = \frac{wL^2}{8T_1} \quad (6)$$

2. Application d'une force transversale F au milieu du câble



Sous l'effet du poids propre (N/m) du câble, celui-ci prend une forme curviligne. Lorsque la force F est appliquée, le câble prend une forme triangulaire.

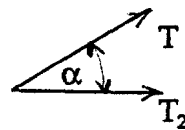
Schéma du corps libre



$$2T \sin \alpha = F$$

L'application de la force F au milieu du câble crée la tension T dans le câble.

À l'ancrage :

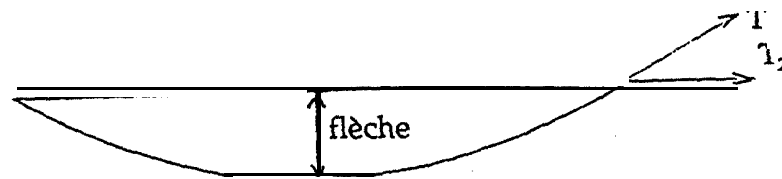


$$T_2 = T \cos \alpha$$

Pour calculer la flèche due à l'application de F , on superpose les deux états suivants :

flèche f = flèche câble pesant avec T + flèche câble non pesant avec T

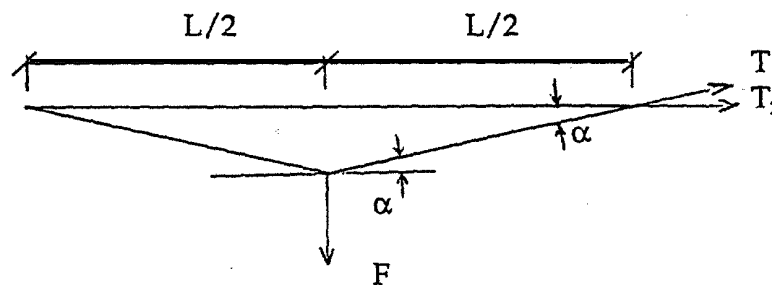
2.1. Flèche câble pesant avec T



D'après la formule 6

$$\text{flèche} = \frac{wL^2}{8T_2}$$

2.2. Flèche câble non pesant avec T



$$2T \sin \alpha = F$$

$$\text{À l'ancrage, } T_2 = T \cos \alpha$$

$$T = T_2 / \cos \alpha$$

$$\frac{2 T_2 \sin \alpha}{\cos \alpha} = F$$

$$2 T_2 \tan \alpha = F$$

$$2 T_2 \frac{f}{L/2} = F$$

$$f = \frac{FL}{4T_2}$$

$$\begin{aligned}
 \text{flèche totale}_2 f &= \frac{wL^2}{8T_2} + \frac{FL}{4T_2} \\
 f_2 &= \frac{wL^2 + 2FL}{8T_2} \tag{7}
 \end{aligned}$$

La formule suivante a été prise de la note technique 67 de l'INRS. Elle permet de calculer la force maximale d'ancrage T

$$(T_2/T_1)^2 = \frac{\{3 (wL + 2F)^2 + (wL)^2\}}{\{4(wL)^2 + \frac{96T_1^2 (T_2 - T_1)}{EA}\}} \tag{8}$$

3. **Article 2.10.12.3 du code de sécurité pour les travaux de construction du Québec**

Câble de secours horizontal

2.10.12 Ceinture de sécurité

2.10.12.3. Le point d'attache du lien de retenue doit être :

- a) ancré à un élément ayant une résistance à la rupture d'au moins 18 kN; ou
- b) attaché à un dispositif antichute ou à une descendeur conforme à la norme Dispositif antichutes, descendeurs cordes d'assurance ACNOR Z 259.2-M1979, relié à un câble de secours ou ancré à un élément ayant une résistance à la rupture d'au moins 18 kN; ou
- c) attaché à un système de câble de secours horizontal et d'ancrages conçu par un ingénieur, ainsi qu'en fait foi un plan ou une attestation disponible sur les lieux même du chantier de construction; ou
- d) attaché à un câble de secours horizontal conforme aux normes minimales suivantes:
 - i) ce câble est un câble d'acier d'un diamètre minimum de 12 mm (1/2 ") relâché selon un angle minimum de 1° vertical pour 12° horizontal, soit 5° par rapport à l'horizontal;
 - ii) sa portée entre les ancrages ne peut être supérieure à 12 m;
 - iii) il est fixé à des ancrages ayant une résistance à la rupture d'au moins 90 kilonewtons;
 - iv) il ne peut être utilisé par plus de deux travailleurs à la fois.

3.1 Remarques et commentaires

Article 2.10.12 3(d)

La force $F = 18 \text{ kN}$ appliquée au centre du câble comprend déjà une marge de sécurité qui prend en compte l'effet amortissant du système câble-lien. Par conséquent, on détermine par l'équilibre statique la tension dans le

câble et on compare cette tension à la résistance à la rupture du câble métallique. Si cette tension est inférieure à la résistance à la rupture du câble métallique, ce dernier peut être utilisé comme câble de secours. La tension du câble calculée à partir des 18 kN ne doit pas être pondérée par un autre coefficient de sécurité lors de la conception du câble.

3.2. **Article 2.10.12 3(a)**

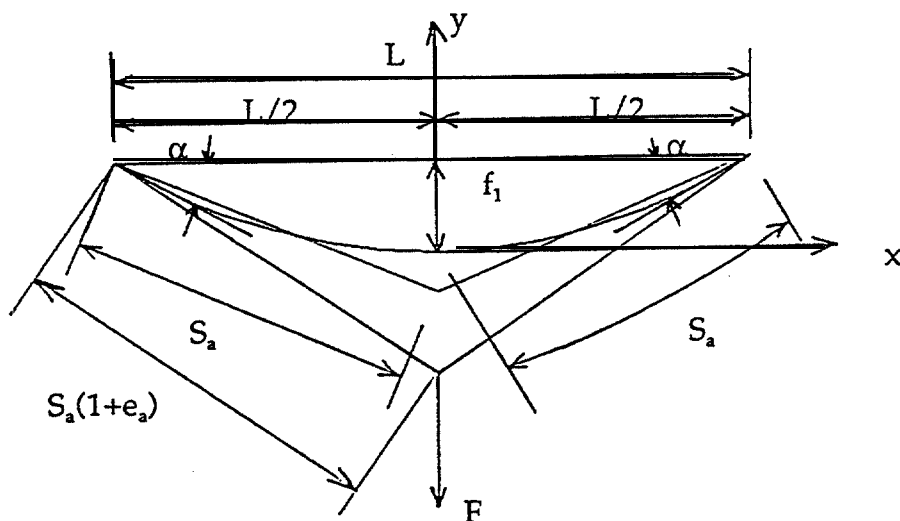
Ce doit être un câble d'acier d'un diamètre minimal de 1/2". Les essais de Sulowski et al ont montré qu'un câble de 3/8" peut être utilisé comme câble de secours horizontal; cependant, la force maximale d'ancrage est de l'ordre de 50 % de la résistance à la rupture du câble. En considérant les aléas de fabrication, l'usure, la corrosion, et les conditions d'utilisation sur les chantiers, il est préférable d'après l'article 2.10.12.3 d (i) d'utiliser un câble métallique d'un diamètre minimal de 1/2" pour un travailleur. De plus, l'article recommande de détendre le câble selon un angle minimal de 1 vertical pour 12 horizontal, soit 5° par rapport à l'horizontal. Les essais de Sulowski et al ont montré que cette hypothèse est trop sécuritaire.

Exemple : Pour un câble de 36 pieds de portée relâché selon un angle minimum de 1 vertical pour 12 horizontal, la flèche à mi-portée est égale à 1.5 pieds.

4. Calcul de la force maximale d'ancrage d'après l'analyse parabolique

Soit le câble suivant, de portée L , de poids linéaire w N/m, ancré aux points A et B, tendu à une tension initiale S_a . Sous l'effet du poids propre du câble et de la tension initiale le câble prend une forme curviligne qu'on approchera par l'équation parabolique.

Les résultats expérimentaux de Sulowski et al. ont montré que les forces d'ancrage sont maximales lorsque le point de chute de la masse est à mi-portée du câble. Dans les paragraphes suivants, on étudie des câbles de portée variable avec point de chute à mi-portée afin de déterminer les forces maximales d'ancrage et par la suite on déterminera les conditions de l'article 2.10:12.3.(d) du code sécurité pour les travaux de construction du Québec à respecter lorsque la force à appliquer au centre du câble est 18 kN et aucun calcul d'ingénieur n'est requis.



Vue la symétrie, les tensions dans les deux parties sont égales et l'angle α avec l'horizontale aux ancrages A et B est égal.

On a vu dans les paragraphes précédents que la flèche à mi-portée, prise par le câble sous l'effet du poids propre et de la tension initiale, est donnée par l'équation suivante :

$$f_1 = \frac{wL^2}{8T_1} \quad (6)$$

w poids linéaire du câble, N/m

L portée du câble, m

T_1 tension initiale N

f_1 flèche du câble à mi-portée, m

La déformée y pour la demi-parabole en fonction de x est donnée par l'équation suivante:

$$Y = \frac{wx^2}{2T_1} \quad (5)$$

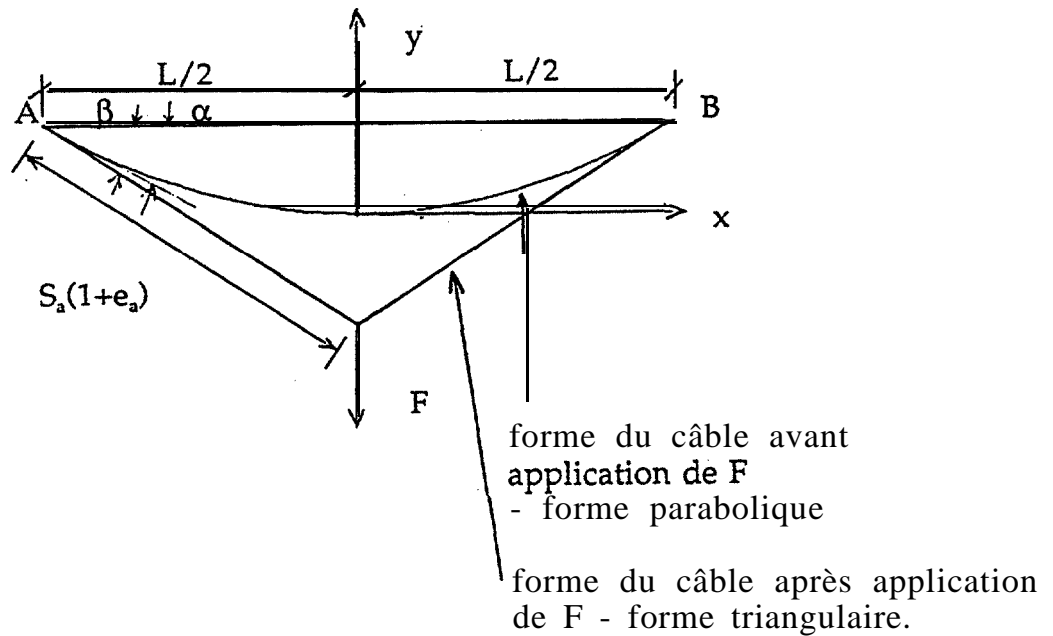
On calcule la longueur de la demi-parabole.

$$S_a = \int_{\text{demi-parabole}} ds \quad (3)$$

La longueur de la demi-parabole est

$$S_a = \frac{L}{2} + \frac{w^2L^3}{48T_1^2} \quad (9)$$

Après application de la charge F à mi-portée, le câble change de forme, passant de la forme parabolique à la forme triangulaire, puis s'allonge, et l'angle β pris de chaque côté des ancrages est quelconque et dépend de la force F . Par contre l'angle α , est un paramètre sur lequel on peut agir lors de l'installation du câble.



β dépendra de la force F.

$$y = \frac{wx^2}{2T_1} \quad (5)$$

De (5)

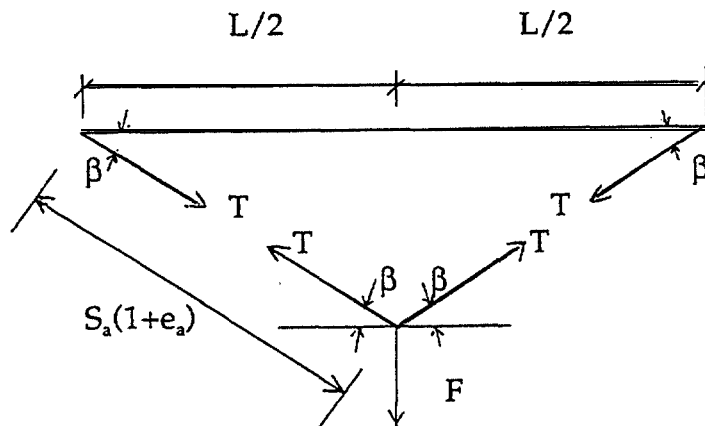
$$y' = \frac{wx}{T_1}$$

$$\text{A l'ancrage A ou B } y' = (wL) / (2 T_1) = \tan \alpha \quad (10)$$

α l'angle de la tangente à l'ancrage et l'horizontale avant application de la force F.

5. Équation statique

Après application de la force F (c'est-à-dire lors de la chute du travailleur), on suppose que le câble prend la forme triangulaire.



Projection verticale des composantes de forces

$$T \sin \beta + T \sin \beta = F \quad (11)$$

$$2T \sin \beta = F$$

$$T = F / (2 \sin \beta) \quad (12)$$

$$\cos \beta = L / \{ 2S_a (1 + e_a) \} \quad (13)$$

$$e_a : \text{allongement du câble} = T / AE \quad (14)$$

F : force appliquée à mi-portée, kN

A : aire du câble, mm^2

T : tension dans le câble, kN

E : module d'élasticité du câble, kN/mm^2

$$\cos \beta = \frac{L}{2S_a(1 + \frac{T}{AE})} = \frac{LAE}{2S_a(AE + T)} \quad (15)$$

$$\cos^2 \beta = \frac{(LAE)^2}{4S_a^2(AE + T)^2} \quad (16)$$

$$\text{De (12), } T^2 = F^2 / (4 \sin^2 \beta) \quad (17)$$

$$\sin^2 \beta = 1 - \cos^2 \beta$$

$$T^2 = F^2 / \{4(1 - \cos^2 \beta)\} \quad (18)$$

$$T^2 = \frac{F^2}{4\{1 - \frac{(LAE)^2}{4S_a^2(AE + T)^2}\}} \quad (19)$$

Les paramètres L , A , E , S_a sont les données géométriques et caractéristiques du câble. L'équation (19) permet de calculer la force maximale d'ancrage T lorsque $F = F_{\max}$ dans le lien de retenue. Si on veut appliquer l'alinéa du Code de sécurité pour les travaux de construction du Québec, on prend $F = 18 \text{ kN}$ et on calcule T . Cette équation est difficile à résoudre analytiquement. Dès lors, on procède soit par une fonction solve d'une calculatrice programmable, soit par approximation successive en prenant une valeur numérique de T . On calcule T et on compare sa valeur numérique à celle de

$$\frac{F^2}{4\{1 - \frac{(LAE)^2}{4S_a^2(AE + T)^2}\}} \quad (19)$$

6. Effet de la portée

Le tableau suivant illustre l'effet de la portée sur la force maximale d'ancrage pour le câble de 12.7 mm (1/2") diamètre 6 x 25 IWRC grade 110/120, tendue initialement à $T_1 = 300$ N et sollicité à mi-portée par $F_{\max} = 18$ kN.

$$\begin{aligned} A &= 126.68 \text{ mm}^2 \\ E &= 64.8 \text{ kN mm}^2 \\ F_{\max} &= 18 \text{ kN au centre du câble.} \end{aligned}$$

| T_1 (N) | w (N/m) | L (m) | T (kN) |
|-----------|---------|-------|--------|
| 300 | 6.42 | 3 | 69.0 |
| 300 | 6.42 | 4 | 68.7 |
| 300 | 6.42 | 5 | 68.3 |
| 300 | 6.42 | 6 | 67.7 |
| 300 | 6.42 | 7 | 67.1 |
| 300 | 6.42 | 8 | 66.4 |
| 300 | 6.42 | 9 | 65.6 |
| 300 | 6.42 | 10 | 64.8 |
| 300 | 6.42 | 11 | 63.9 |
| 300 | 6.42 | 12 | 62.8 |
| 300 | 6.42 | 30 | 43.1 |

La force d'ancrage diminue avec la portée. Entre 3 et 12 m de portée, le décroissement de la force d'ancrage est lent (Réf. : Sulowski). À partir de 30 m de portée, la force d'ancrage diminue beaucoup. On notera cependant qu'un câble de 30 m, tendu à 300 N, a une flèche de 2.40 m à mi-portée.

7. Effet de la tension initiale

Le tableau suivant illustre l'effet de la tension initiale sur la force maximale d'ancrage pour le câble de 12.7 mm de diamètre (1/2") 6 x 25 IWRC grade 110/120.

$$A = 126.68 \text{ mm}^2$$

$$E = 64.8 \text{ kN mm}^2$$

$$F_{\max} = 18 \text{ kN au centre du câble.}$$

| T_1 (N) | w (N/m) | L (m) | T (kN) |
|-----------|---------|-------|--------|
| 100 | 6.42 | 3 | 65.6 |
| 200 | 6.42 | 3 | 68.5 |
| 300 | 6.42 | 3 | 69.0 |
| 500 | 6.42 | 3 | 69.3 |
| 1000 | 6.42 | 3 | 69.6 |
| 3000 | 6.42 | 3 | 69.6 |
| 6000 | 6.42 | 3 | 69.6 |

On constate que la tension initiale accroît la force d'ancrage, mais l'accroissement de la force d'ancrage n'est pas aussi considérable qu'on pouvait le penser (Sulowski et al arrivent à la même conclusion).

8. Application - Construction des abaques de la force maximale d'arrêt et de la force maximale d'ancrage à partir des formules de la statique obtenues à partir de l'analyse parabolique

Les formules suivantes sont utilisées pour construire les abaques de flèches et l'abaques de la force maximale d'ancrage.

Force maximale d'arrêt dans le lien de retenue à point d'ancrage fixe

Formule (2) de l'annexe A

$$F_{\max} = mg \left[1 + \sqrt{\left(1 + \frac{2 EA H}{mg L}\right)} \right] \quad (\text{A2})$$

Équation de la parabole

$$y = \frac{wx^2}{2T_1}$$

Flèche et pente à l'abscisse x

$$f = \frac{wx^2}{2T_1} \quad (5)$$

$$y' = \tan \alpha = \frac{wx}{T_1} \quad (2)$$

$$\text{À l'ancrage } x = \frac{L}{2} ; \quad \tan \alpha = \frac{wL}{2T_1}$$

$$S_x = \frac{L}{2} + \frac{w^2 L^3}{48T_1^2} \quad (9)$$

$$\text{À } x = \frac{L}{2} ; \quad f_1 = \frac{wL^2}{8T_1} \quad (6)$$

$$f_2 = \frac{wL^2 + 2FL}{8T} \quad (7)$$

Force maximale d'ancrage

$$T^2 = \frac{F^2}{4\left\{1 - \frac{(LAE)^2}{4S_a^2 (AE + T)^2}\right\}} \quad (19)$$

Les abaques qu'on peut voir dans la première partie du document ont été calculés pour les systèmes de câbles de secours couramment utilisés sur les chantiers Québec:

Lien de retenue en nylon

Longueur $L = 1.5$ m
 Diamètre $d = 16$ mm (5/8 “)
 Aire $A = 201$ mm²
 Module d'élasticité $E = 240$ MPa
 Masse qui chute $m = 100$ kg

Pour un facteur de chute $H/L = 1$, la force maximale d'ancrage est:

$$F_{\max} = 100 \times 9.81 \left[1 + \sqrt{1 + 2 \times (240 \times 201 \times 1) / (100 \times 9.81)} \right]$$

$$= 10.759 \text{ kN}$$

Ou d'après l'abaque 1, pour $H/L = 1$

$$F_{\max} = 10.759 \text{ kN}$$

Câble de secours horizontal en acier

Câble 6 x 25 IWRC grade 110/120

Diamètre $d = 12.7$ mm (1/2 “)
 Aire $A = \pi d^2 / 4 = \pi \times 12.7^2 / 4 = 126.68$ mm²
 Module d'élasticité $E = 64.8 \times 10^8$ Pa = 64.8 kN/m²

La flèche initiale varie de 0.1 mètre à 0.50 mètres pour une portée variant de :
 à 40 mètres.

Annexe E

Conception des ancrages de câbles de secours horizontaux

1. Conception des ancrages de câbles de secours horizontaux (extrait du cours de M P, Sibille, Professeur à Polytechnique)

1.1. Moment de flexion simple

Considérons un élément A fixé à un élément B par des boulons disposés tel qu'indiqué Fig. 1 a et b. L'élément A étant soumis uniquement à un moment de flexion M_f , agissant dans le plan de symétrie de l'assemblage, le seul déplacement relatif possible des éléments A et B est une rotation autour d'un axe XX perpendiculaire au plan du moment de flexion et situé dans le plan de l'assemblage. Cet axe délimite automatiquement la région comprimée de la région tendue mais, tandis que les contraintes de compression se transmettent de A à B en tous points de la surface de contact, les contraintes de traction ne peuvent se transmettre que par l'intermédiaire des boulons. La section active est donc l'aire hachurée (Fig. 1 a).

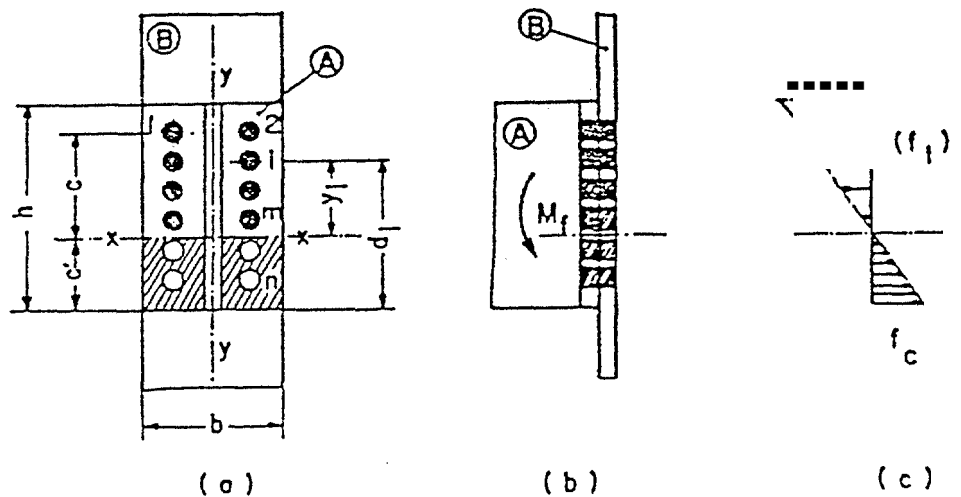


Fig. 1

Dans la rotation autour de l'axe XX, les déplacements sont proportionnels à la distance à cet axe XX et les contraintes qui en découlent (Fig. 1 c) sont également proportionnelles à cette distance.

On est donc dans un cas identique à celui de la flexion pure en Résistance des Matériaux, la seule différence étant que la section active est inconnue et qu'elle doit être déterminée.

On peut écrire: $f_c = kc' \quad (f_t)_i = ky_i$ (1)
avec:

f_c = contrainte de compression maximale en MPa
 $(f_t)_i$ = contrainte de traction dans le boulon i en MPa
 k = coefficient de proportionnalité entre la contrainte en un point et sa distance à l'axe XX. La valeur de k s'exprime en N/mm³

On obtient les deux relations suivantes:

$$\frac{1}{2} bc'^2 + c' \sum_{i=1}^m a_i - \sum_{i=1}^m a_i d_i = 0 \quad (2)$$

$$k = \frac{M_t}{\sum_{i=1}^m a_i y_i^2 + \frac{bc'^3}{3}} \quad (3)$$

La relation (2) permet de déterminer la valeur de c' et la valeur de l'autre inconnue (k) est fournie par la relations (3).

Il est très important de se rappeler que dans ces relations, m représente non pas le nombre total de boulons, mais uniquement le nombre de boulons situés dans la région tendue. Par conséquent, pour écrire l'équation du second degré (2), qui doit nous permettre de déterminer la valeur de c' , il faut connaître m , ce qui oblige de connaître la position de l'axe XX. Il semble donc impossible de déterminer c' puisque, pour le déterminer, il faut le connaître. Remarquons cependant que la connaissance exacte de c' n'est pas nécessaire. En effet, pour écrire l'équation 2, il suffit de savoir quels sont les boulons tendus et, par conséquent, entre quelles rangées de boulons est situé l'axe XX,

La détermination de c' se fera donc de la manière suivante:

- Choisir un espace limité par deux rangées de boulons consécutives, dans lequel on suppose que l'axe XX est situé.
- Ecrire l'équation 2 correspondant à cette hypothèse.
- Résoudre cette équation du second degré et vérifier si la valeur obtenue pour c' est conforme à l'hypothèse faite en a. Si l'hypothèse est vérifiée, la valeur obtenue est la valeur exacte de c' ; si l'hypothèse n'est pas vérifiée, il faut recommencer en choisissant un autre espace pour l'axe XX et ce, jusqu'à détermination de la valeur exacte de c' .

Dans le choix du premier espace pour l'axe XX, on pourra le situer dans la même région que $h/7$, cette quantité ne pouvant, en aucun cas, être considérée comme valeur exacte ou approchée de c' .

La connaissance de c' permettra de déterminer la valeur de k par la relation (3). Si on remplace k par cette valeur dans les relations (2), on obtient les valeurs de f_c et $(f_t)_{\max}$.

$$f_c = \frac{M_f c'}{\sum_{i=1}^m a_i y_i^2 + \frac{bc'^3}{3}} \quad (4)$$

$$(f_t)_{\max} = \frac{M_f c}{\sum_{i=1}^m a_i y_i^2 + \frac{bc'^3}{3}} \quad (4)$$

avec: $c = Y_{\max}$

L'effort de traction dans le boulon le plus sollicité sera donc donné par la relation

$$T_{\max} = \frac{M_f c a_j}{\sum_{i=1}^m a_i y_i^2 + \frac{bc'^3}{3}} \quad (5)$$

avec: $a_j =$ aire du boulon pour lequel $y = y_{\max}$, en mm^2 .

Remarquons que le dénominateur des relations 4 représente le moment d'inertie par rapport à l'axe XX de la section active. On retrouve donc la formule d'équarissage vue en Résistance des Matériaux, la difficulté résidant dans la détermination de la section active. Les restrictions d'application de la formule d'équarissage existent pour les relations (4), à savoir qu'elles ne sont applicables que si le moment de flexion agit dans un des plans principaux d'inertie.

Dans le cas, très fréquent, où tous les boulons ont le même diamètre, et les relations (2), (4) et (5) s'écrivent:

$$\frac{1}{2} bc'^2 + m a c' - a \sum_{i=1}^m d_i = 0 \quad (6)$$

$$f_c = \frac{M_f c'}{\sum_{i=1}^m y_i^2 + \frac{bc'^3}{3}} \quad (7)$$

$$(f_t)_{\max} = \frac{M_f c'}{\sum_{i=1}^m y_i^2 + \frac{bc'^3}{3}} \quad (7)$$

$$T_{\max} = \frac{M_f c'}{\sum_{i=1}^m y_i^2 + \frac{bc'^3}{3}} \quad (8)$$

2. Moment de flexion et effort tranchant

Si l'assemblage est soumis, en plus du moment, à un effort tranchant V , chaque boulon devient dès lors le siège de contraintes normales dues au moment, et de contraintes tangentielles dues à V . Les contraintes normales se calculeront suivant les relations précédentes; quant aux contraintes tangentielles, elles se calculeront conformément aux formules usuelles les de la résistance de matériaux. Le boulon étant soumis à la fois à des contraintes normales et tangentielles, on applique les équations concernant les sollicitations composées.

Bibliographie

AFNOR, S 71 - 020, Équipements individuels de protection contre les chutes, Juin 1989, 13 p.

AFNOR, S 71 - 022, Équipements individuels de protection contre les chutes avec dénivellement, Décembre 1989, 21 p.

Caisse Nationale de l'Assurance Maladie, INRS, Note Technique No 166, Harnais de sécurité, Équipements individuels de protection contre les chutes dans le montage-levage, 1980, 2 p.

Caisse Nationale de l'Assurance Maladie, INRS, Note Technique No 167, Harnais de sécurité, Note pour la détermination des câbles de sécurité utilisés en montage-levage, 1980, 4 p.

Caisse Nationale de l'Assurance Maladie, INRS, Note Technique No 167 bis, Harnais de sécurité, Choix et installation d'un câble d'assurance, 1980, 4 p.

CEBTP, Procès-Verbal d'essais sur le matériel de sécurité "Ligne de vie", 1987, 13 p.

CETE Apave, Essais d'une ligne de vie à Herlicq Le Creusot 1985, 7 p.

CRAM Normandie, Rapport d'essais d'une ligne d'Assurance, Mars 1988, 30 p.

CRAM Rouen, Recommandation relatives à l'utilisation d'un TIRFOR comme composante d'une ligne d'assurance, Avril 1988, 4 p.

CTICM, Note Technique No 44, Câble de sécurité du personnel de montage équipé de ceintures de montage avec amortisseur de chute, Construction Métallique, 1975, 3 p.

CTICM, Note Technique No 98, Mesure dynamique de la tension d'un câble, Septembre 1977, 6 p.

CTICM, Note Technique No 99, Câble de sécurité du personnel de montage équipé de ceintures de montage avec amortisseur de chute, Construction Métallique, 1977, 6 p.

CTICM, Note Technique No 138, Détermination des câbles assurant la sécurité des personnels des entreprises de montage-levage équipés de harnais., 1978, 4 p.

Da yawansa, P.H., Goh, C.C., Wilkie, R., Analysis and testing of a static line system, Bldg. Melbourne Research Labs. Rep No. MRC/C N8/89/001, December 1989, 39 p.

Dubois, J.C., Les points d'ancrages, CRAM Normandie, Mai 1990, 10 p.

Éditeur officiel du Québec, Code de sécurité pour les travaux de construction, 5-2.1, 1^{er} Mars 1990.

Herlicq, Disque pour ligne de vie, 1985, 5 p.

Institut Canadien de la Construction en Acier, Handbook of Steel Construction, 1985.

Sulowski, A.C., Miura, N., Horizontal Lifelines, Report No 83-294-H, Ontario-Hydro Research Division, 1983, 97 p.