

→ J. Paureau, M. Jacqmin,
service Machines et dispositifs
de protection,
Centre de recherche de l'INRS,
Nancy

Lignes de vie

Spécifications. Essais

LIFE LINES

SPECIFICATIONS. TESTINGS

This article describes the two main types of lifeline: those which comprise devices such as springs designed to increase the angle of equilibrium of the cable and those without. It lists the information required for their design and explains how to determine the characteristics of the different components (cables, springs and, where applicable, the proper settings, i.e. cable slack) in relation to the mechanical strength of the anchorage structure. It gives a method for calculating fall arrest distance and compares the results with those obtained experimentally. Tips are also given on materials that can be used to increase lifeline durability, and on rational use of lifelines. Finally, the authors give the initial results obtained with a new type of lanyard absorber that pays rope out at a constant force, avoiding the disadvantages of "tear"-type absorbers. This new type of absorber should provide better control of fall arrest distances and help to optimise lifeline design.

● lifeline ● mechanical device
● fall arrest distance ● energy absorber ● testing

Cet article décrit les deux grands types de lignes de vie : celles dotées de dispositifs tels que des ressorts, destinés à augmenter l'angle d'équilibre du câble, celles qui en sont dépourvues. Il recense les données nécessaires à leur conception. Il indique les méthodes permettant de déterminer les caractéristiques des divers composants (câbles, ressorts et le cas échéant, les conditions de réglage : mou du câble) en fonction de la résistance mécanique de la structure d'accueil. Il donne une méthode de calcul de la distance d'arrêt des chutes et en compare les résultats aux déterminations expérimentales. Il propose également des nuances de matériaux, propres à assurer la pérennité des lignes de vie. Il recommande un mode d'utilisation rationnelle. Il indique enfin, les premiers résultats obtenus avec un nouveau type d'absorbeur de longe à force de déploiement bien définie et constante, qui ne présente pas les inconvénients des absorbeurs à déchirure. Ce nouveau type d'absorbeur permettrait de mieux maîtriser la distance d'arrêt des chutes et rendrait possible l'optimisation des lignes de vie.

● ligne de vie ● résistance mécanique ● distance d'arrêt de chute
● absorbeur d'énergie ● essai

Les lignes de vie sont utilisées depuis fort longtemps dans le Bâtiment et les Travaux publics, pour l'assurance des travailleurs exposés à des chutes avec dénivellation lorsqu'ils doivent intervenir sur des zones étendues. Ces lignes de vie sont constituées de câbles ou de cordes tendues horizontalement en général, entre deux pièces d'attache ancrées à la construction. Des dispositifs élastiques destinés à limiter les efforts aux points d'ancrage sont parfois intercalés entre ceux-ci et le câble. Ce dernier peut également être supporté par des pièces de passage intermédiaires réparties régulièrement en général, entre les deux pièces d'ancrage extrêmes (cf. *fig. 1*). Le travailleur est relié à la ligne de vie par une longe, munie généralement d'un absorbeur de choc. La liaison entre la longe et la ligne de vie est assurée par un mousqueton, libre de coulisser sur celle-ci.

En France, deux fiches techniques du Comité technique national du Bâtiment et

des Travaux publics (CTN 02) traitent des lignes de vie réalisées en câbles d'acier de 13,2 et 15,4 mm de diamètre, sans pièces de passage intermédiaires. La première [1] (note annexe R 167 à la fiche technique R 166) donne les tensions et flèches de ces lignes de vie en fonction de leur pré-tension et de leur longueur. La seconde [2] (note annexe R 167 bis à la fiche technique R 166) donne les gardes au sol minimales.

Miura et Sulowski [3] ont établi, dans le cas de la chute d'une masse rigide, les lois de comportement théoriques des associations lignes de vie d'une seule travée et langes, ces dernières étant munies ou non d'un absorbeur d'énergie. Ils calculent ainsi, en fonction de la tension initiale et de la longueur de cette ligne de vie, la hauteur de chute totale d'une masse de 100 kg, la force maximale d'arrêt et les efforts aux points d'ancrage, lorsque la masse produit ses effets au milieu de cette ligne de vie, au quart de sa longueur et à 1 m d'un ancrage. Ils ont vérifié expérimentalement leurs

prévisions théoriques avec un certain succès. Ils comparent également les résultats théoriques et expérimentaux obtenus pour certaines configurations dans le cas de la chute simultanée de deux masses, l'une de 100 kg au milieu de la ligne de vie et l'autre de 110 kg, au milieu ou au quart de celle-là. Arteau et Lan [4] ont effectué une étude simplifiée des lignes de vie, en négligeant leur masse et l'effet du déplacement vertical de la longe.

Pour une force maximale de choc $F = 6$ kN, une longueur entre points d'ancrage de 30 mètres et une tension initiale $T = 3$ kN par exemple, les forces aux points d'ancrage atteignent d'après les trois études citées, des valeurs de l'ordre de 30 à 40 kN lorsque les lignes de vie sont réalisées à partir de câbles en acier. Des efforts de cet ordre peuvent conduire à renforcer les structures ou à les dimensionner au-delà de ce qui serait nécessaire pour qu'elles résistent aux effets combinés de leur poids propre, des charges d'exploitation et des charges climatiques.

Les praticiens ont constaté que les efforts aux points d'ancrage du câble étaient moindres si celui-ci était posé avec un certain « mou ». Cette mesure n'est cependant pas toujours suffisante et l'effort de traction du câble, lors d'une chute, est très sensible aux conditions de pose de la ligne de vie, qui doivent alors être définies très précisément.

Pour réduire l'intensité des forces aux points d'ancrage, Alarent et coll. [5] proposent d'attacher la ligne de vie sur des potelets déformables capables d'absorber l'énergie de la chute. Dans l'approximation d'un comportement quasi statique, la déformation des potelets se poursuit jusqu'à la satisfaction des conditions d'équilibre de la ligne de vie. Cette déformation diminue la décélération du freinage de la chute mais en accroît la distance d'arrêt. Un compromis entre l'une et l'autre est à trouver.

Par ailleurs, les lignes de vie, par l'adoption de coefficients de sécurité suffisants ou par le choix de dispositions constructives adéquates, doivent être parfaitement sûres.

Le problème de la pérennité des lignes de vie n'est pas traité dans la littérature à la connaissance des auteurs. Il préoccupe beaucoup, cependant, les préventeurs. Il ne peut être laissé dans l'ombre.

Les concepteurs et les préventeurs expriment le souhait de connaître les caractéristiques physiques et dimensionnelles à donner aux lignes de vie pour qu'elles satisfassent aux conditions :

- de sûreté,
- de non-surchage de la structure d'accueil,
- de progressivité optimale du freinage de la chute,
- de pérennité.

Cet article vise à fournir tous les éléments permettant de satisfaire ce souhait.

1. Domaine d'application

La présente étude concerne plus particulièrement les lignes de vie rectilignes installées sur potelets verticaux ; mais les conclusions peuvent s'étendre sans difficulté à tout autre type de ligne de vie.

L'étude est restreinte au cas des lignes de vie équipées de dispositifs à déformations élastiques ou considérées comme telles.

La valeur maximale de l'angle d'équilibre que forme le câble de la ligne de vie avec l'axe reliant les points d'ancrage, est limitée à 25°. Des valeurs d'angle d'équilibre supérieures à 25° ne se rencontreront que sur des structures très légères, ce qui en principe est rare dans le domaine industriel. Pour les valeurs de cet angle supérieures à 25°, les résultats qui permettent de déterminer les caractéristiques des lignes de vie restent néanmoins utilisables. La précision des calculs n'est affectée que pour la détermination de la flèche du câble à la pose de celui-ci et de la distance d'arrêt de la chute (cf. § 6).

2. Méthode d'étude

Il existe deux types de lignes de vie : Celles dites du « premier type » qui ne comportent pas de composants destinés à augmenter l'angle d'équilibre du câble ; celles dites du « second type » qui en comportent.

Les données communes aux deux types de lignes de vie sont :

- La longueur l du câble,
- le nombre n de travées,
- la distance h entre la ligne joignant les points d'ancrage et la surface sur laquelle le travailleur intervient, dans le cas d'une ligne de vie sur charpente,

- l'intensité de la force maximale admissible T_m aux points d'ancrage,
- la force de déploiement de l'absorbeur F_M prise égale, par mesure de sécurité, à la valeur maximum fixée par la norme NF EN 355, soit 6 kN [7].

Caractéristiques à déterminer :

pour les **lignes du premier type** :

- la nature et les propriétés mécaniques du câble,
- le mou de ce câble éventuellement introduit à la pose ;

pour les **lignes du second type** :

- les mêmes caractéristiques que celles du premier type, avec en supplément
- la loi de comportement des dispositifs adjoints au câble destinés à en augmenter l'angle d'équilibre. Si ces dispositifs sont des ressorts, cette loi de comportement en est caractérisée par la raideur et la course.

La force de choc sollicitant les lignes de vie étant supposée connue, le problème revient à en déterminer, à l'aide des lois de comportement, les domaines des caractéristiques physiques et géométriques à l'intérieur desquels les conditions précédemment citées (sûreté, non-surchage de la structure d'accueil, progressivité optimale du freinage de la chute, pérennité) sont satisfaites.

Pour aboutir à des résultats facilement exploitables, on est contraint « d'idéaliser » la réalité en « construisant » des modèles simplifiés des systèmes étudiés. Les hypothèses simplificatrices adoptées dans la construction de ces modèles ne doivent cependant pas s'opposer à une représentation réaliste des phénomènes.

La présente étude comprend les sept parties suivantes :

- expression des quatre conditions à respecter par les lignes de vie,
- établissement des relations traduisant les lois de comportement des deux types de ligne de vie,
- détermination des caractéristiques des lignes de vie,
- détermination de la réponse des systèmes en termes de distance d'arrêt de la chute,
- expérimentation d'une ligne de vie équipée d'un dispositif élastique,
- comparaison et discussion des résultats théoriques et expérimentaux,
- utilisation rationnelle des lignes de vie.

Les termes utilisés dans l'étude sont définis dans l'encadré ci-contre.

ENCADRÉ 1

NOMENCLATURE

NOTATION	GRANDEUR	[UNITÉ]
C_{mini}	course théorique des ressorts	[m]
D	distance d'arrêt de la chute	[m]
L	allongement de la longe	[m]
F_M	force de déploiement de l'absorbeur de choc	[N]
f	flèche de la ligne de vie	[m]
f_n	flèche naturelle du câble sous son poids	[m]
H	hauteur de chute libre du sujet	[m]
H_{eff}	hauteur de chute effective du sujet	[m]
K	raideur des ressorts de la ligne de vie	[N.m ⁻¹]
K_m	valeur maximale admissible de K	[N.m ⁻¹]
K'	raideur résultante du câble et des ressorts	[N.m ⁻¹]
K_a	raideur de l'absorbeur	[N.m ⁻¹]
K_h	raideur du harnais	[N.m ⁻¹]
h	hauteur des potelets	[m]
K_l	raideur de la longe	[N.m ⁻¹]
K'_l	raideur résultante de la longe et du harnais	[N.m ⁻¹]
k	raideur unitaire du câble de la ligne de vie	[N]
l	longueur de la ligne de vie	[m]
Δl_0	jeu équivalent de la longe	[m]
Mg	poids du sujet	[N]
n	nombre de travées de la ligne de vie	-
P	longueur des travées	[m]
R	résistance à la rupture des câbles assemblés	[N]
S	coefficient de sécurité	-
T	tension du câble sous la force F_M	[N]
T_m	tension maximale admissible du câble	[N]
x	$x = \sin \theta_M$	-
v	température du câble	[°C]
v_{inf}	température minimale d'utilisation du câble	[°C]
v_{sup}	température maximale d'utilisation du câble	[°C]
v_p	température du câble lors de la pose	[°C]
α_c	coefficient de dilatation linéaire du câble	[°C ⁻¹]
δ	déploiement de l'absorbeur	[m]
θ_M	angle d'équilibre de la ligne de mire sous la force F_M	[rad, °]
θ_{Mm}	angle d'équilibre maximal de la ligne de vie sous la force F_M	[rad, °]
θ_μ	angle d'équilibre d'une ligne de vie montée sans dispositif absorbeur	[rad, °]
λ	longueur de la corde de la longe	[m]
μ	mou de la ligne de vie à une température donnée : déplacement qu'il faut imposer à l'une des extrémités du câble, l'autre étant fixée, pour le tendre s'il était sans masse	[m]
μ_{inf}	mou de la ligne de vie à la température v_{inf}	[m]
μ_{sup}	mou de la ligne de vie à la température v_{sup}	[m]
μ_p	mou de la ligne de vie introduit à la pose	[m]
μ_m	mou maximal admissible	[m]

3. Expression des conditions à respecter par les lignes de vie

3.1. Condition de sûreté

Les coefficients de sécurité des pièces dont la rupture entraînerait celle du système doivent être supérieurs ou égaux à deux.

Les dispositifs comportant des composants dont le coefficient de sécurité est inférieur à deux (ressorts par exemple), doivent être conçus de telle sorte que la rupture de ces pièces n'entraîne pas celle du système. Les principes de sécurité positive et de redondance peuvent être utilement mis à profit.

3.2. Conditions de non-surcharge de la structure d'accueil

En vertu des hypothèses 1 et 2 (cf. § 4.1), l'équilibre du câble de la ligne de vie se traduit par la relation (fig. 1) :

$$T = \frac{F_M}{2 \sin \theta_M} \quad (1)$$

T : tension du câble de la ligne de vie sous la force F_M ,

F_M : force nécessaire au déploiement de l'absorbeur de choc,

θ_M : angle d'équilibre du câble de la ligne de vie.

La condition de non-surcharge de la structure d'accueil se traduit alors par l'inégalité :

$$T \leq T_m \quad (2)$$

T_m : force maximale admissible aux points d'ancrage de la ligne de vie.

La valeur de T_m doit être déterminée par le maître d'œuvre, en fonction de la position, par rapport à la structure d'accueil, des points d'ancrage du câble, des directions prévisibles les plus défavorables prises par ce câble au voisinage de ceux-ci et de la classe de résistance de cette structure d'accueil.

Le *tableau 1* fixe cinq classes de résistance et propose pour chacune d'elles, les intervalles de T_m .

Les caractéristiques mécaniques d'une structure existante doivent en être évaluées à partir des dimensions et de la constitution.

Une structure à concevoir devra être calculée en tenant compte des efforts et moments exercés par les supports de la ligne de vie sur la structure, l'intensité des actions de cette ligne de vie aux points d'ancrage étant prise égale à la valeur de T_m retenue. Les coefficients de pondération prévus dans les règles de l'art ou codes de calculs des structures pour ces actions, seront ceux relatifs aux surcharges d'exploitation. Leur degré de simultanéité avec les charges d'exploitation et les charges climatiques devra être évalué cas par cas.

3.3. Condition de progressivité du freinage

Paureau [6] a montré que lors d'une chute en position verticale, freinée par l'action d'un EPI dont l'absorbeur de choc est supposé se déployer à force constante, le rachis pouvait subir des surcharges oscillatoires de l'ordre de 30 % de la force moyenne de compression à laquelle il est soumis du fait du freinage de cette chute. Ces surcharges deviennent pratiquement négligeables si l'effort de freinage avant de devenir constant, croît linéairement en fonction du temps et si le temps de montée de cet effort est supérieur ou égal à 0,09 s. A effort de freinage donné, la force de compression du rachis prend donc une valeur minimale qui ne dépend plus que de la valeur stabilisée de l'effort de freinage. Cependant, toute durée de montée en effort supérieure à 0,09 s, accroît inutilement la distance d'arrêt de la chute. La valeur optimale de la durée de montée en tension de la longe est donc de 0,09 s.

Pour déterminer les caractéristiques de la ligne de vie permettant de satisfaire aux conditions optimales du freinage de la chute, il faudrait être en mesure de modéliser le comportement dynamique du système d'assurance afin de pouvoir en calculer la réponse au choc. Or les exigences de la norme EN 355 [7] sur les absorbeurs de choc sont si larges que tout absorbeur dont la force de déploiement est comprise entre 2,5 et 6 kN peut être déclaré conforme à cette norme. Avec un tel intervalle de variation, la loi de comportement des absorbeurs de choc est indéterminée a priori. Il serait possible d'établir mathématiquement l'expression de la réponse au choc du système d'assurance ; mais dans celle-ci figureraient les paramètres relatifs à l'absorbeur de choc et le calcul de la réponse de ce système d'assurance resterait impossible. Nous avons donc renoncé à établir l'expression de cette réponse qui

dans l'état actuel de la technique, ne présenterait qu'un intérêt purement théorique. Nous renonçons en même temps à la condition de freinage optimal. Celle-ci est pourtant d'une grande importance. Aussi conviendrait-il que les fabricants s'orientent vers la production d'absorbeurs de choc à force de déploiement contrôlée, dont la valeur ne devrait être ni trop faible pour obtenir un freinage efficace de la chute, ni trop forte pour éviter des sollicitations exagérées du rachis.

La commercialisation de tels dispositifs justifierait alors un complément d'étude qui permettrait de formuler la condition de freinage optimal de la chute.

3.4. Condition de pérennité

Cette condition impose l'invariance des caractéristiques géométriques mécaniques et physiques de la ligne de vie. Le respect de cette condition implique l'absence de composants à déformations irréversibles (potelets à déformations plastiques par exemple), et l'utilisation de matériaux inaltérables.

La condition de pérennité pourrait néanmoins être considérée comme respectée avec une ligne de vie comportant des composants à déformations irréversibles, si ceux-ci sont immédiatement remplacés après avoir été sollicités au delà de leur domaine de déformations réversibles.

Les matériaux seront choisis parmi ceux qui présentent naturellement ou qui ont acquis par traitement, une bonne tenue dans le temps à la corrosion. Les câbles devront être en acier inoxydable austénitique (de type 18 % Cr, 10 % Ni) plutôt qu'en acier galvanisé en raison des risques de corrosion toujours possibles avec ce matériau, entre les brins de câble.

Les dispositifs élastiques peuvent être en acier inoxydable austénitique très écrouis du type Z 10 CN18-09 ou en acier inoxydable à durcissement structural des types Z5 CNU17 ou Z6 CND15-07. Les autres accessoires et éléments d'assemblage peuvent être en acier inoxydable du type Z6 CN18-19 ou en acier galvanisé.

4. Loi de comportement des lignes de vie

4.1. Hypothèses

1. Les masses des différents composants mobiles de la ligne de vie sont négligeables par rapport à la masse du travailleur.
2. L'absorbeur de choc se déploie à force constante, notée F_M . Il est indéformable sous l'action d'une force inférieure à F_M .
3. Le harnais s'allonge proportionnellement à l'effort auquel il est soumis. Il se comporte comme un ressort de raideur K_h .
4. L'allongement de la longe est proportionnel à la somme de la force à laquelle elle est soumise, et d'une force de valeur constante. Elle se comporte comme un ressort de raideur K_l monté en série avec un organe de liaison possédant un jeu Δl_0 .
5. Les ressorts de la ligne de vie s'allongent proportionnellement aux forces qui les sollicitent. Ils sont caractérisés par une raideur K .
6. Le câble de la ligne de vie se déforme élastiquement. Il est caractérisé par sa raideur unitaire k .
7. Les dissipations d'énergie dans les composants du système à l'exclusion de l'absorbeur d'énergie de la longe pendant le déploiement sont négligées.
8. La ligne de vie est divisée en n travées égales de longueur P .
9. Les ancrages sont indéformables.

4.2. Ligne de vie du premier type

On démontre que la loi de ce comportement d'une ligne de vie du premier type s'exprime par la relation suivante (cf. annexe I) :

$$\frac{F_M n}{2k} = \text{tg } \theta_\mu - \frac{P + \mu}{P} \sin \theta_\mu \quad (3)$$

θ_μ est l'angle d'équilibre de la ligne de vie, sous la force de déploiement F_M de l'absorbeur de choc, P la longueur des travées, k la raideur linéique du câble et μ est la « valeur de calcul ». Cette relation est représentée sur la figure 2.

TABEAU I
INTERVALLES DES VALEURS DE LA FORCE MAXIMALE ADMISSIBLE AUX POINTS D'ANCRAGE D'UNE LIGNE DE VIE EN FONCTION DE LA CLASSE DE RÉSISTANCE DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL

Classe de résistance de la structure	Très légères	Légères	Moyennes	Fortes	Très fortes
Intervalles des valeurs de T_m (kN)	5-7	7-10	10-15	15-25	> 25

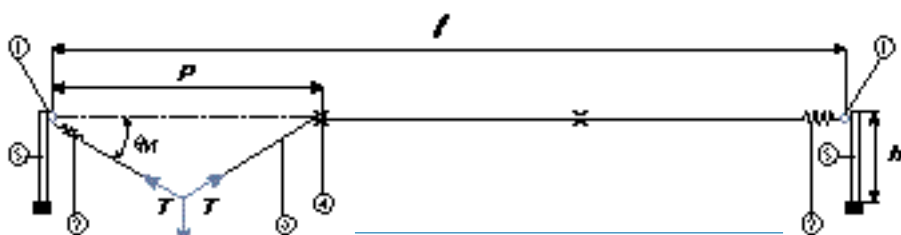


Fig. 1. Ligne de vie
 1 - Points d'ancrage, 2 - Dispositif destiné à augmenter l'angle d'équilibre du câble (ressort), 3 - Câble, 4 - Point de passage intermédiaire

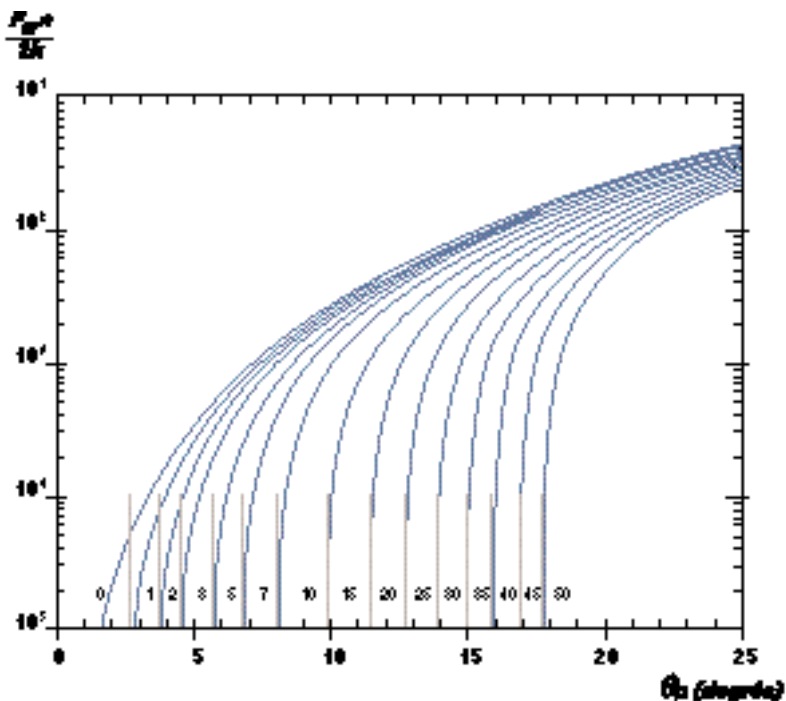


Fig. 2. Détermination du mou μ du câble d'une ligne de vie montée sans dispositifs destinés à augmenter l'angle d'équilibre du câble
 La figure représente la relation (3) entre la force maximum de choc F_M , le nombre de travées n , la raideur unitaire du câble k , l'angle d'équilibre de la ligne de vie θ_μ et le rapport μ/P du mou du câble à la longueur des travées. Les courbes sont graduées en valeurs de $10^3 \mu/P$

Il sera indiqué plus loin (cf. § 4.4) que le mou réel varie en fonction de la température v du câble. On sera alors amené à préciser dans ce paragraphe, la valeur qu'il prend à certaines températures remarquables et les valeurs à utiliser dans les calculs.

4.3. Ligne de vie du second type

4.3.1. Expressions mathématiques

Les dispositifs interposés entre le câble et les pièces d'ancrage et destinés à accroître l'angle d'équilibre du câble sont dorénavant supposés être des ressorts. Ils sont définis par leur raideur K et par leur course. On démontre que la loi de comportement d'une ligne de vie du second type s'exprime par la relation suivante (cf. annexe II) :

$$K = \frac{2k}{1 \left[\frac{n_\infty}{n} - \left(1 + \frac{\mu k}{Tl} \right) \right]} \quad (4)$$

avec :

$$n_\infty = \frac{2k (\operatorname{tg} \theta_M - \sin \theta_M)}{F_M} \quad (5)$$

θ_M étant la valeur de θ lorsque $F = F_M$ dans la relation (1).

Lorsque $T = T_m$, θ_M , n_∞ et K prennent respectivement les valeurs θ_{Mm} , $n_{\infty m}$ et K_m dans les relations (4) et (5), μ étant la valeur du mou adoptée dans les calculs.

Remarques

a) Lorsque $\mu = 0$, K tend vers l'infini lorsque n tend vers n_∞ . n_∞ s'interprète alors comme le nombre minimal de travées au delà duquel la ligne de vie, supposée tendue, n'a pas besoin de ressorts, l'élasticité étant apportée par le câble lui-même.

b) Le nombre de travées au delà duquel la ligne de vie n'a plus besoin de ressorts décroît lorsque le mou croît.

4.3.2. Représentation graphique

La loi de comportement des lignes de vie du second type peut s'exprimer assez simplement sous forme graphique, dans le cadre de la présente étude (cf. § 1) où $\theta_M \leq 25^\circ$. On peut en effet admettre avec une approximation acceptable les égalités :

$$\sin \theta_M \approx \operatorname{tg} \theta_M \approx \theta_M$$

On démontre alors que θ_M est la racine réelle positive de l'équation suivante (annexe III) :

$$\theta_M^3 - \frac{2\mu}{P} \theta_M - \frac{F_M}{PK'} = 0 \quad (6)$$

où K' est la raideur résultante de l'ensemble câble-ressorts qui s'exprime par la relation suivante :

$$\frac{1}{K'} = \frac{2}{K} + \frac{1}{k} \quad (7)$$

La détermination de cette racine est facilitée par l'utilisation de la figure 3. La valeur de θ_M , obtenue par application de la relation (1), est l'abscisse du point d'intersection de la droite de paramètre :

$$p = K'P/F_M$$

et de la courbe de paramètre :

$$q = 2 \mu K'/F_M.$$

4.4. Appellations et expressions du mou

Les dilatations ou contractions thermiques différentielles du câble par rapport à la structure d'accueil modifient le mou de ce câble. On est alors conduit aux appellations suivantes :

- Mou de calcul μ . C'est la valeur « entrée » dans les relations ou les diagrammes traduisant les lois de comportement des lignes de vie.

- Mou minimum μ_{inf} . C'est le mou à la température minimum d'utilisation v_{inf} des lignes de vie. Par mesure de sécurité, la condition $\mu_{\text{inf}} \geq \mu$ doit être satisfaite.

- Mou de pose μ_p . C'est le mou à la température de pose v_p .

- Mou maximum μ_{sup} . C'est le mou à la température maximum d'utilisation v_{max} des lignes de vie.

- Mou maximum admissible μ_m . C'est la valeur maximale admissible de μ pour une utilisation rationnelle des lignes de vie.

Les données qui permettraient de déterminer les variations dimensionnelles de la structure sont généralement inconnues. On est alors conduit à les négliger, ce qui va dans le sens d'une plus grande sécurité. Le mou de pose et le mou maximum s'expriment alors par les relations suivantes :

$$\mu_p = \mu_{\text{inf}} + \alpha_c l (v_p - v_{\text{inf}}) \quad (8)$$

$$\mu_{\text{sup}} = \mu_{\text{inf}} + \alpha_c l (v_{\text{sup}} - v_{\text{inf}}) \quad (9)$$

avec $\alpha_c = 16,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ pour des câbles en acier inoxydable.

En France métropolitaine, on admettra les valeurs suivantes :

$$v_{\text{inf}} = -15 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$v_{\text{sup}} - v_{\text{inf}} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$$

Dans le cas d'un câble en acier inoxydable, l'équation (9) pour la France métropolitaine se met sous la forme suivante :

$$\mu_{\text{sup}} = \mu_{\text{inf}} + 10^{-3} l$$

Pour qu'une ligne de vie sur toiture puisse être utilisée rationnellement (cf. § 9), il ne faut pas que le câble puisse être amené en contact avec cette toiture par simple action manuelle. Le respect de cette condition, dans l'hypothèse d'un câble non présent, conduit à l'équation suivante :

$$\frac{\mu_m}{P} = \frac{2h^2}{P^2} \quad (10)$$

où h : hauteur des potelets [m].

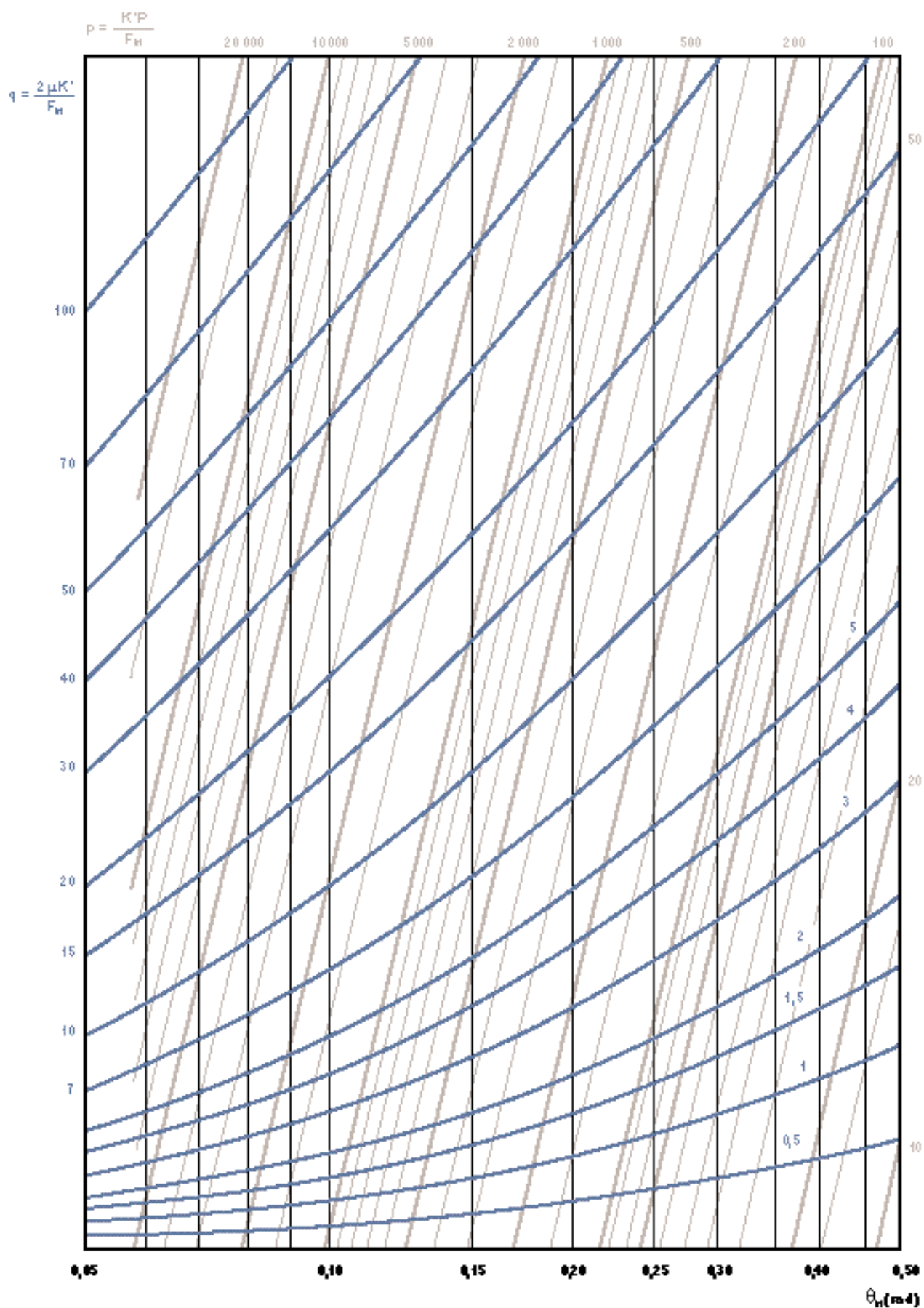


Fig. 3. Résolution graphique de l'éq. (18) La valeur de l'angle d'équilibre θ_M exprimé en radians, est l'abscisse de l'intersection de la courbe de paramètre $K'P/F_M$ et de la courbe de paramètre $2\mu K'/F_M$

5. Détermination des caractéristiques des lignes de vie

Les conditions de pose d'une ligne de vie du premier type sont exposées au § 5.1.3.3. Il conviendra donc de vérifier si les déterminations des caractéristiques de ces lignes de vie, obtenues par application des § 5.1.1 à 5.1.3.2, sont compatibles avec ces conditions.

5.1. Lignes de vie du premier type

5.1.1. Résistance à la rupture du câble R

Elle doit satisfaire l'inéquation suivante :

$$R \geq T_m \frac{100 + \alpha}{100} S$$

où α est l'affaiblissement en pourcent de la résistance du câble, dû à la réalisation des boucles d'ancrage et S le coefficient de sécurité. En vertu de la valeur adoptée pour ce coefficient (cf. § 3.1) :

$$R \geq 2 T_m \frac{100 + \alpha}{100} \quad (11)$$

Remarque

Dans le cas de l'utilisation de serre-câbles du genre « Stat-grip », pour réaliser les boucles d'ancrage : $\alpha \approx 20\%$.

5.1.2. Raideur linéique du câble k

Un câble satisfaisant à la condition de résistance définie par l'inéquation (11) étant choisi, k se calcule alors par la relation :

$$k = \frac{T_m}{\left(\frac{\Delta l}{l}\right)_m} \quad (12)$$

A partir de l'allongement relatif du câble choisi $(\Delta l/l)_m$, déterminé sur la courbe efforts-allongements qui le caractérise, à la valeur d'effort égale à T_m .

5.1.3. Détermination du mou

5.1.3.1. Mou minimum μ_{inf}

En adoptant l'hypothèse limite : $\mu = \mu_{inf}$, le mou μ_{inf} se détermine à partir de la relation (3) ou de la figure 2. La valeur de

θ_μ choisie doit satisfaire la relation (1) et l'inéquation (2). Le résultat de cette détermination est la valeur de $(\mu_{inf} + P)/P$ lorsqu'on utilise la relation (2) ou la valeur de μ_{inf}/P lorsque l'on utilise la figure 2, d'où la valeur de μ_{inf} .

5.1.3.2. Mou de pose μ_p , mou maximum μ_{sup} , mou maximum admissible μ_m

Ils se calculent respectivement par les relations (8), (9) et (10).

5.1.3.3. Conditions de pose d'une ligne de vie du premier type (cas d'une ligne de vie sur toiture)

Le mou μ_{inf} déterminé au § 5.1.3.1 doit être inférieur au mou μ_m obtenu au § 5.1.3.2. De plus, la dilatation du câble sous la différence de température ($v_{sup} - v_{inf}$) doit être suffisamment faible par rapport à μ_{inf} . On admettra qu'elle doit rester inférieure ou égale au tiers de μ_{inf} . Les conditions de pose d'une ligne de vie du premier type s'écrivent alors sous la forme :

$$3 \alpha_c \cdot l \cdot (v_{sup} - v_{inf}) \leq \mu_{inf} \leq \mu_m$$

soit encore, pour un câble en acier inoxydable en France métropolitaine :

$$l / 300 \leq \mu_{inf} \leq \mu_m$$

Ces conditions impliquent l'inégalité suivante :

$$l \leq 300 \mu_m$$

Si cette condition n'est pas satisfaite, la ligne de vie doit être du second type (cf. § 5.2).

5.1.3.4. Méthode de réglage du mou μ_p à la pose

Si le montage de la ligne de vie sans ressorts est permis, le mou effectif à la pose est calculé par la relation (8). Celui-ci est la somme du mou réel μ_{pr} et du mou μ_0 introduit par le poids du câble sous la tension T_m , de sorte que :

$$\mu_p = \mu_{pr} + \mu_0$$

En première approximation, le mou μ_0 dû au poids du câble tendu sous la force T_m découle de la formule (3) en prenant respectivement pour θ_μ et F_M les valeurs de $\pi P / 2 T_m$ et de πP , π étant le poids linéique du câble. En pratique, μ_0 est tout à fait négligeable et μ_p se confond avec μ_{pr} .

La méthode de réglage du mou de pose [8] consiste à appliquer, au milieu d'une travée, une force verticale Q supérieure à la quantité :

$$8 \pi P \cdot \sqrt{\left(n - \frac{3}{4}\right)}$$

et à régler la flèche f_p du câble au point d'application de cette force Q pour obtenir le mou μ_p souhaité. Pour cela, on utilise la figure 3 dans laquelle on remplace K' par (k/l) et F_M par Q.

On calcule la valeur q_p du paramètre q correspondant au mou μ_p par la relation :

$$q_p = 2 \mu_p \cdot (k/l) / Q \quad (13)$$

On calcule ensuite la valeur p_p du paramètre p par la relation :

$$p_p = (k/l) (P/Q)$$

On détermine le point d'intersection des courbes de paramètres q_p et p_p . Soit θ_p l'abscisse en radians de ce point. La flèche f_p doit être réglée à la valeur :

$$f_p = P \cdot \theta_p / 2$$

5.2. Lignes de vie du second type

5.2.1. Résistance à la rupture R et raideur linéique du câble

On procède comme aux § 5.1.1 et 5.1.2.

5.2.2. Détermination du mou

5.2.2.1. Mou de calcul μ

• Si $l/300 < \mu_m$, μ_m étant déterminé par la relation (10), μ doit satisfaire les conditions suivantes :

$$l/300 \leq \mu \leq \mu_m$$

• Si $l/300 \geq \mu_m$, μ doit être pris égal à zéro.

5.2.2.2. Mou minimum μ_{inf}

La valeur de μ_{inf} doit être aussi voisine que possible de celle choisie pour μ , tout en lui étant supérieure.

5.2.2.3. Mou de pose μ_p , mou maximum μ_{max}

Ils se calculent respectivement à l'aide des relations (8) et (9).

5.2.3. Raideur des ressorts K

5.2.3.1. Méthode mathématique

Le respect de l'inéquation (2) se traduit par la relation : $K \leq K_m(\mu)$, $K_m(\mu)$ étant la valeur de K conduisant à l'égalité $T = T_m$, d'après la relation (4), pour la valeur de μ choisie (cf. § 5.2.2.1). Connaissant F_M et T_m , on détermine $\theta_M = \theta_{Mm}$ par la relation (1). On calcule ensuite la valeur $n_{\infty m}$ de n_{∞} par la relation (5) puis la valeur maximale K_m de K par la relation (4), lorsque $T = T_m$.

Une valeur de K inférieure à $K_m(\mu)$ est alors choisie aussi voisine que possible de cette valeur. Si la valeur choisie de K est inférieure de moins de 5 % à celle de K_m , on admettra que :

$$\theta_M \approx \theta_{Mm} \text{ et que } T \approx T_m.$$

Si la différence ($K_m - K$) est supérieure à $0,05 K_m$, les valeurs de θ_M et de T sont à calculer en fonction de la valeur choisie pour K .

Détermination de θ_M et de T dans le cas où $K_m - K > 0,05 K_m$

Pour éviter la résolution d'équations complexes, la valeur de T correspondant aux valeurs de K , μ et k choisies est calculée par itérations.

On détermine une suite de valeurs T_j , inférieures à T_m de l'ordre de :

$$5 \cdot [(K_m - K)/K_m] \cdot j \% \quad (j = 1, 2 \dots s).$$

Les suites de valeurs suivantes sont alors calculées :

- celle des valeurs de $\sin \theta_{Mj}$ à partir de la suite des valeurs de T_j à l'aide de la relation (1) ;
- celle des valeurs de $n_{\infty j}$ à partir de la suite des valeurs de $\sin \theta_{Mj}$ à l'aide de la relation (5) ;
- celle des valeurs de K_j à partir de la suite des valeurs de $n_{\infty j}$ à l'aide de la relation (4).

La variation des valeurs de K_j est tracée sur un graphique en fonction des valeurs de T_j . Par interpolation linéaire, la valeur de T correspondant à celle de K est déterminée. En pratique, il suffit de trouver deux valeurs suffisamment proches encadrant la valeur de K . Quelques opérations suffisent pour y parvenir.

5.2.3.2. Méthode graphique

Cette méthode est basée sur l'utilisation de la figure 3. La procédure suivante doit être appliquée :

a) donner à μ une valeur conforme aux conditions explicitées au § 5.2.2 ;

b) calculer $\theta_M = \theta_{Mm}$ à l'aide de la relation (1) en donnant à T la valeur T_m ;

c) déterminer la valeur p_0 du paramètre $p = K'P/F_M$ de la droite passant par le point d'abscisse :

$$\theta_M = \theta_{Mm} \text{ de l'axe des } \theta_M ;$$

d) calculer la valeur $K'_0 = F_M \cdot p_0 / P$;

e) calculer la valeur q_0 du paramètre $q = 2\mu \cdot K' / F_M$ en donnant à K' la valeur K'_0 ;

f) déterminer le point M_1 d'abscisse θ_{Mm} de la courbe de paramètre q_0 ;

g) déterminer la valeur p_1 du paramètre p de la droite passant par M_1 ;

h) calculer la valeur K'_1 de K' par la relation : $K'_1 = F_M \cdot p_1 / P$;

i) calculer la valeur q_1 du paramètre q en donnant à K' la valeur K'_1 ;

j) déterminer le point M_2 d'abscisse θ_{Mm} de la courbe de paramètre q_1 , etc.

Les suites des valeurs p_0, p_1, \dots, p_r et q_0, q_1, \dots, q_r convergent respectivement vers les valeurs des paramètres satisfaisant l'équation (6).

Soit p_{∞} la valeur du paramètre p vers laquelle converge la suite p_0, p_1, \dots, p_r .

K' se calcule par la relation :

$$K' = F_M \cdot p_{\infty} / P$$

La valeur de K se calcule alors par la relation (7).

Cette méthode est moins précise que la méthode mathématique mais elle évite des calculs qui peuvent s'avérer complexes.

5.2.4. Réglage du mou à la pose

On procède exactement comme au § 5.1.3.4 pour le réglage de ce mou. L'opération doit être accomplie en bloquant les dispositifs élastiques de la ligne de vie.

S'ils ne sont pas bloqués, μ_p doit être remplacé dans la relation (13) par la somme du mou de pose calculé comme il est dit au § 5.2.2.3 et de l'allongement de ces dispositifs élastiques sous l'effet de la force Q (cf. § 5.1.3.4).

5.2.5. Course des ressorts

On démontre aisément que la course C des ressorts, compte tenu d'une marge de sécurité de 20 %, est donnée par la relation suivante :

$$1,67 \cdot C = P \cdot \left(\frac{1}{\cos \theta_M} - 1 \right) - \mu_{\text{inf}} - \frac{Tl}{k}$$

le mou μ_{inf} étant déterminé à l'aide de la relation (8) à partir du mou μ_p à la pose et de la température v_p du câble lors de cette opération (θ_M et T sont les valeurs calculées comme il est indiqué au § 5.2.3.1).

Lorsque T_m est inférieur à 10 kN et n'est pas égal ou peu différent de l'unité, la course des ressorts peut atteindre des valeurs qui les rendent très onéreux. Il peut être préférable d'envisager un renforcement partiel de la structure afin de pouvoir adopter une valeur plus élevée de T_m .

6. Distance d'arrêt de la chute

6.1. Intérêt du calcul de la distance d'arrêt

Les forces moyennes de déploiement des absorbeurs commerciaux conformes à la norme NF EN 355 peuvent varier entre 2,5 et 6 kN. La distance d'arrêt ne peut donc être évaluée avec précision. La méthode de calculs proposée permet toutefois d'en déterminer les limites inférieures et supérieures. La connaissance de cette dernière est très utile pour fixer le tirant d'air minimal de sécurité. Il pourra être également utile de voir l'influence sur la distance d'arrêt, de la variation du mou de câble en fonction de la température, en effectuant les calculs avec les valeurs extrêmes de ce mou.

6.2. Expression

6.2.1. Cas d'une ligne de vie sans mou

Soit D la distance d'arrêt de la chute. Elle est la somme :

- de la flèche f de la ligne de vie,

- de l'allongement d de la longe seule et du harnais,
- du déploiement δ de l'absorbeur de choc de la longe.

$$\text{Alors : } D = f + d + \delta \quad (14)$$

Soit H_{eff} la hauteur de chute effective du travailleur. Elle est la somme de la hauteur de chute libre H mesurée par la dénivellation du centre de gravité de ce travailleur à l'instant où la longe commence à se tendre et de l'allongement Δl_0 de la longe à effort nul ; d est donné par l'expression :

$$d = F_M / K'_1$$

en posant :

$$1/K'_1 = 1/K_1 + 1/K_h \quad (15)$$

Le principe de conservation de l'énergie, compte tenu des hypothèses, s'exprime par l'équation suivante :

$$M.g.(H_{\text{eff}} + f + d + \delta) = \frac{T^2}{2K'} + \frac{F_M^2}{2K'_1} + F_M.\delta \quad (16)$$

avec :

$$K' = \frac{1}{\frac{2}{K} + \frac{1}{k}} \quad (17)$$

où K et k se calculent respectivement par les relations (4) et (12).

En posant :

$$z = F_M / Mg \quad (18)$$

puis en portant dans l'équation (14), l'expression de δ tirée de l'équation (16), on obtient tous calculs faits (cf. *annexe IV*) :

$$(z - 1).D = H_{\text{eff}} + z \left(f + \frac{F_M}{2K'_1} - \frac{T^2}{2K'.F_M} \right) \quad (19)$$

$$\text{avec : } f = \frac{P}{2} \cdot \frac{x}{(1 - x^2)^{0,5}} \quad (20)$$

$$\text{et : } \frac{T^2}{2K'.F_M} = \frac{F_M}{8K'.x^2}$$

expressions dans lesquelles :

$$x \approx \sin \theta_M \approx F_M / 2T.$$

Il est alors possible, à partir de l'équation (19), de calculer la distance d'arrêt de la chute en suivant la procédure décrite au § 6.3.

6.2.2. Cas d'une ligne de vie avec mou

f doit être remplacé dans la relation (19) par $f - f_0$, f_0 étant la flèche prise par la ligne de vie au moment où elle commence à se tendre.

$$\text{On démontre aisément que : } f_0 \approx \left(\mu \cdot \frac{P}{2} \right)^{0,5}$$

La relation (19) s'écrit donc :

$$(z - 1).D = H_{\text{eff}} + z \left(f + \frac{F_M}{2K'_1} - \frac{T^2}{2K'.F_M} \right) - z \cdot \sqrt{\mu \cdot \frac{P}{2}} \quad (21)$$

Il a été vu au § 4.4 que le mou variait avec la température du câble. Les valeurs supérieures et inférieures de D à force F_M donnée, sont respectivement obtenues lorsque μ est remplacé par μ_{sup} et par μ_{inf} , lesquels se calculent à l'aide des relations (8) et (9).

6.3. Marche à suivre pour la détermination de la distance d'arrêt D

6.3.1. Données

Les données existantes ou supposées l'être sont :

- la force de choc maximale F_M ,
- le poids du travailleur Mg ,
- la hauteur de chute libre H du travailleur,
- le mou μ du câble de la ligne de vie, dans les conditions de température considérées,
- la longueur P des travées.

Les données à acquérir ou à calculer sont :

- la raideur K' de la ligne de vie,
- la variable $x = \sin \theta_M$,
- la raideur du harnais K_h ,
- la raideur résultante de la longe et du harnais K'_1 ,
- la hauteur de chute effective du travailleur H_{eff} .

En prenant les valeurs limites de F_M : 2,5 kN et 6 kN, on obtient à mou de câble donné, les valeurs limites de la distance d'arrêt, faute de pouvoir déterminer celle correspondant à la valeur réelle de F_M qui n'est en général pas connue.

6.3.2. Calcul de K'

K' se calcule par la relation (17).

6.3.3. Calcul de x

Dans le cadre de la présente étude (cf. § 1) où $\theta_M \leq 25^\circ$, on peut admettre avec une approximation acceptable les égalités :

$$x \approx \sin \theta_M \approx \text{tg } \theta_M \approx \theta_M$$

6.3.4. Détermination de K_1 , de Δl_0 et de H_{eff}

La courbe efforts-allongements d'un cordage peut être approchée par une droite sur un domaine de forces fixé. Celle-ci coupe l'axe des allongements en un point dont l'abscisse est égale à Δl_0 . La pente de la droite détermine la raideur K_1 . Un essai effectué sur une corde de longe a donné pour K_1 [kN/m], une valeur égale à $20/\lambda$ où λ est la longueur [m] de cette corde et pour Δl_0 , une valeur égale à 0,1 m. H_{eff} est égal à la valeur de H augmentée de 0,1 m.

6.3.5. Détermination de K_h

La raideur du harnais peut être déterminée à partir d'un essai de traction à l'aide du mannequin normalisé par l'ancienne norme NF S 71 022 [10].

Un essai effectué sur un harnais du commerce a donné pour K_h , une valeur de 120 kN/m.

Les essais de traction effectués sur ces ressorts ont mis en évidence une non-linéarité accusée des courbes efforts-allongements ainsi qu'une forte hystérésis, croissant avec le nombre de cycles. Il s'est avéré que ces inconvénients étaient dus à des frottements intenses des rondelles belleville sur l'axe central. Le gainage de celui-ci par du téflon a permis de réduire la non-linéarité des courbes efforts-allongements, de stabiliser le cycle d'hystérésis et d'en réduire la surface.

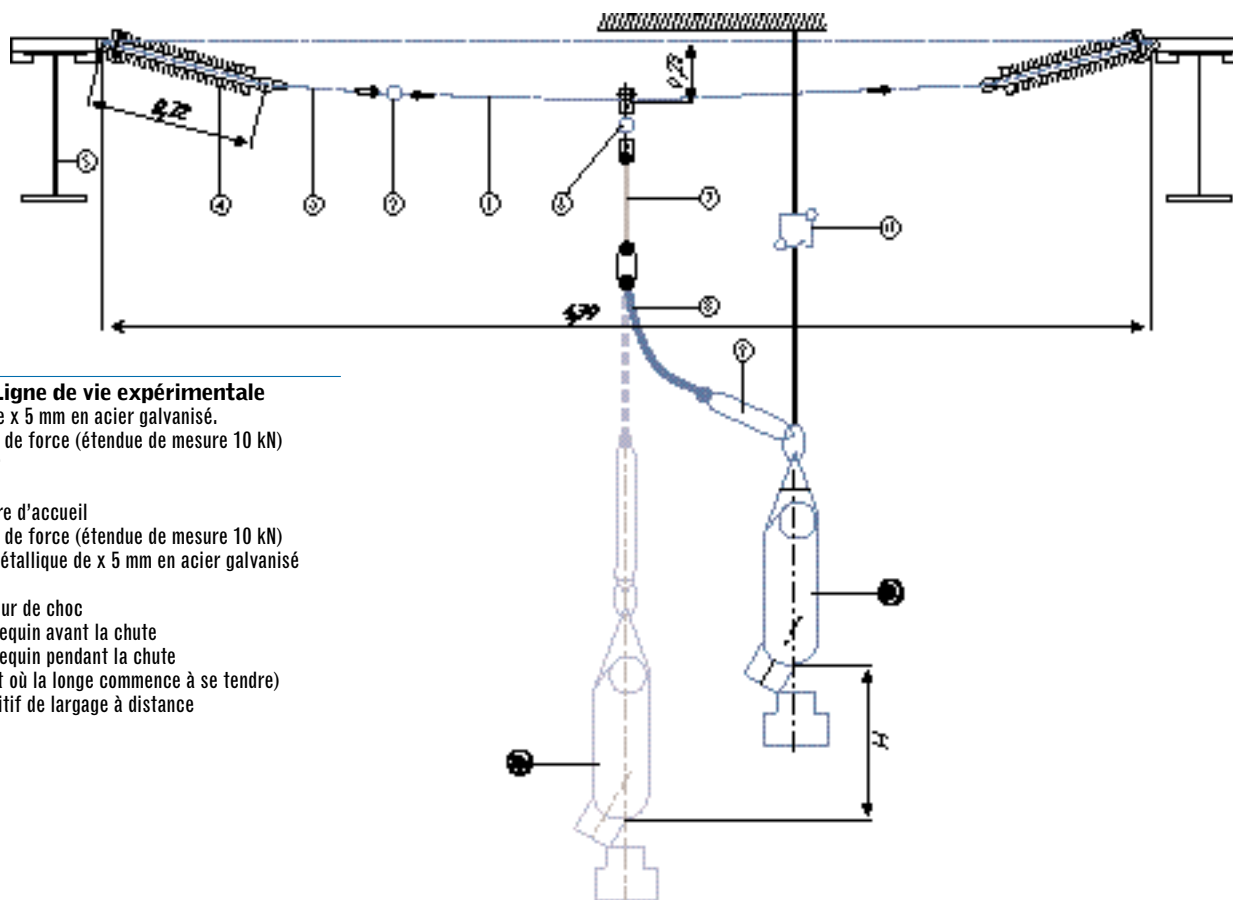


Fig. 4. Ligne de vie expérimentale

- 1 - Câble de x 5 mm en acier galvanisé.
- 2 - Capteur de force (étendue de mesure 10 kN)
- 3 - Tendeur
- 4 - Ressort
- 5 - Structure d'accueil
- 6 - Capteur de force (étendue de mesure 10 kN)
- 7 - Câble métallique de x 5 mm en acier galvanisé
- 8 - Longe
- 9 - Absorbeur de choc
- 10a - Mannequin avant la chute
- 10b - Mannequin pendant la chute (au moment où la longe commence à se tendre)
- 11 - Dispositif de largage à distance

6.3.6. Détermination de K'_1

K'_1 se calcule à l'aide de la relation (15) (cf. § 6.2.1).

6.3.7. Calcul de z

Il se fait à partir de la relation (18) (cf. § 6.2.1).

6.3.8. Calcul de D

A partir des valeurs de x et de P, on détermine f à l'aide de la relation (20).

A partir de la valeur de x et de celle calculée de $F_M/8K'$, on détermine $F_M/8K'x^2$.

A partir des valeurs de F_M et K'_1 , on détermine $F_M/2K'_1$.

On obtient ensuite D par application de la relation (21) ou de la relation (19), selon que la ligne de vie est montée avec ou sans mou.

7. Vérification expérimentale

7.1. Description de la ligne de vie expérimentale (fig. 4)

Une ligne de vie dont les caractéristiques sont données dans le *tableau II* a été installée entre deux portiques du hall d'essai de l'établissement de Neuves-Maisons de l'INRS. Les poteaux de ces derniers sont constitués de I de 400 mm x 200 mm et les supports de toiture de I de 620 mm x 250 mm. En raison de ces dimensions et de la pose d'une barre stabilisatrice entre les portiques, les déformations de la structure d'accueil de la ligne de vie sous l'effet des sollicitations relativement faibles de celle-ci (force inférieure à 7 kN) peuvent être considérées comme négligeables. Les ressorts ont été réalisés à partir de 55 couples de rondelles Belleville montées en opposition de 80 mm de diamètre extérieur, 2 mm d'épaisseur, 3 mm de flèche totale. Ces couples ont été empilés et guidés sur un axe en acier de 40 mm de diamètre.

TABLEAU II

CARACTERISTIQUES DE LA LIGNE DE VIE EXPERIMENTALE

Distance entre les points d'ancrage	P = 4,39 m
Nombre de travées	n = 1
Câble :	
diamètre	5 mm
matériau	acier galvanisé
résistance à la rupture	18,5 kN
raideur unitaire	k = 1 250 kN
Ressorts :	
nombre	2
poids	17 kg
longueur	0,72 m
force maximale d'utilisation	7 kN
course maximale	0,25 m
raideur moyenne à 6 kN	50 kN.m ⁻¹
Angle d'équilibre maximal de la ligne de vie	$\theta = 30^\circ$

7.2. Essais statiques de la ligne de vie expérimentale

Le *tableau III* donne en fonction de la force F appliquée verticalement au milieu du câble (*fig. 5*) :

- les tensions T_A et T_B aux points d'ancrage A et B, déterminées géométriquement à partir des relevés dimensionnels ;
- les tensions T_{AM} mesurées en A,
- les valeurs mesurées de la flèche f de la ligne de vie,
- les valeurs de l'angle θ du câble avec la ligne AB,
- les valeurs théoriques T_{th} de T calculées d'après la relation (1) pour différentes valeurs de F .

Dès que F dépasse 100 daN, $T_{AM} \approx T_{th}$. Les poids du câble et des ressorts peuvent être pratiquement négligés dans le diagramme d'équilibre des forces.

7.3. Essais dynamiques

7.3.1. Méthode

La ligne de vie expérimentale a été essayée au choc en laissant tomber d'une hauteur H donnée, un mannequin de 106 kg accroché à la ligne de vie par un équipement de protection individuelle commercial, constitué d'une longe normalisée, d'un absorbeur d'énergie et d'un harnais (*fig. 4*). La méthode consiste à :

- mesurer la position de l'extrémité inférieure de la longe, sous une force de 20 N, le poids du mannequin étant soulagé en conséquence,
- élever ensuite le mannequin de la hauteur H choisie (H a été fixé à 1,5 m et à 2,5 m),
- le suspendre à un crochet à ouverture télécommandée,
- le laisser tomber,
- enregistrer en fonction du temps les efforts dans la ligne de vie T et dans la longe F ,

- filmer le mouvement du mannequin,
- déterminer l'élongation maximale du système à partir des images du film.

Six essais ont été effectués. Les quatre premiers ont été réalisés avec des absorbeurs à déchirure du commerce et les deux derniers, avec un absorbeur d'énergie expérimental, se déployant à force constante, contrairement à ceux du commerce qui opposent une résistance en dents de scie à l'allongement. Les deux premiers essais ont été effectués avec les ressorts sans gainage intérieur en téflon, les quatre autres avec gainage. La figure 6 représente les enregistrements des tensions F de la longe et T du câble en fonction du temps, de l'essai n° 1.

7.3.2. Résultats

Le *tableau IV* donne les principales données expérimentales, les valeurs mesurées des efforts de traction maximums de la longe et du câble, les valeurs calculées des termes de la relation (19), les distances d'arrêt maximales calculées et mesurées. Il donne également la valeur du facteur $K'P/F_M$ de la relation (6) qui permet de calculer la valeur théorique de θ_M et celles de $x = \sin \theta_M$ obtenues par la formule (1) à partir des valeurs de T et F_M .

Dans la relation (19), la flèche de la ligne de vie doit être remplacée par $f - f_0$, f_0 étant la flèche initiale due au poids des ressorts. Dans le cas présent :

$$f_0 = 0,23 \text{ m.}$$

TABLEAU III

EQUILIBRE STATIQUE DE LA LIGNE DE VIE EXPERIMENTALE (fig. 5)

F [kN]	T _A [kN]	T _B [kN]	T _{AM} [kN]	f [m]	T _{th} [kN]	θ [°]
0	—	—	0,040	0,230	0	9,7
1,06	2,20	2,21	2,35	0,565	2,12	14,4
3,45	5,47	5,44	5,36	0,760	2,57	19,1
6,00	7,10	7,10	—	—	7,10	25,0

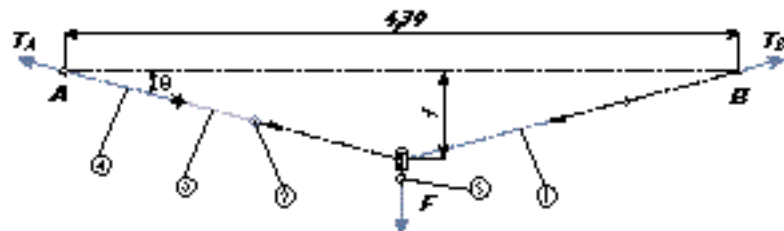


Fig. 5. Essais statiques de la ligne de vie

- 1 - Câble
- 2 - Capteur de force (étendue de mesure 10 kN)
- 3 - Tendeur
- 4 - Ressort
- 5 - Capteur de force (étendue de mesure 5 kN)

TABLEAU IV

RESULTATS : COMPARAISON DES DISTANCES D'ARRÊT THEORIQUES ET EXPERIMENTALES
 K'_1 (kN) = $20/\lambda$ (m). $K' = 25$ kN/m

Essais nos	λ (m)	F _M (kN)	T (kN)	x -	F _M /2K' ₁ (m)	F _M /8K' ₁ .x ² (m)	K'P/F _M -	θ _M (rad)	f-f ₀ (m)	J.z/(z-1)(*) (m)	H _{eff} /(z-1) (m)	D _{th} (**) (m)	D _{exp} (**) (m)
1	1,60	3,70	5,40	0,342	0,16	0,16	29,7	0,32	0,57	0,79	0,59	1,38	2,13
2	1,60	4,70	-	-	0,21	0,19	23,4	0,35	0,59	0,77	0,43	1,20	1,60
3	1,64	5,50	6,70	0,410	0,25	0,16	19,9	0,37	0,59	0,82	0,35	1,18	1,09
4	1,65	5,00	6,50	0,385	0,23	0,17	21,9	0,36	0,69	0,93	0,40	1,34	1,46
5	1,72	4,70	6,00	0,395	0,22	0,15	23,4	0,35	0,70	0,97	0,43	1,41	1,31
6	1,72	4,40	6,60	0,333	0,21	0,20	24,9	0,34	0,55	0,72	0,76	1,49	1,53

(*) $J = f - f_0 + (F_M/2K'_1) - (T^2/2K'F_M)$. (**) D_{th} : distance d'arrêt théorique. D_{exp} : distance d'arrêt expérimentale.

La longe est le siège d'une dissipation d'énergie d'origine viscoélastique. Paureau [9] a montré que la diminution de la force de choc due à cette dissipation d'énergie était de l'ordre de 20 % sur des cordes de spéléologie de 10 mm de diamètre et de 2 m de long. Si l'on suppose un effet similaire sur les longes, le terme $F_M/2K_1$ devrait être diminué de 3 à 5 cm environ. Il ne le sera pas toutefois du fait qu'il n'a pas été tenu compte de la composante d'allongement élastique de l'absorbeur d'énergie.

La tension initiale du câble n'est pas nulle mais de l'ordre de 40 daN. Le terme $F_M/8Kx^2 = T^2/2KF_M$ est donc majoré du quotient par F_M , de l'énergie qu'auraient absorbée les ressorts entre $T = 0$ daN et $T = 40$ daN ; mais cette énergie est le centième environ de l'énergie maximale emmagasinée dans ces ressorts. Elle peut donc être négligée.

Pour les 4 derniers essais, les écarts entre les valeurs expérimentales et calculées de la distance d'arrêt ne dépassent pas 9 % de ces dernières, en valeur absolue. Pour le premier et le second essais par contre, les écarts atteignent respectivement 54 % et 33 %.

8. Discussion

■ Il a été vu que l'hypothèse 1 (masse des composants négligeables) pouvait être considérée comme bien vérifiée en statique. En dynamique, il peut en aller différemment. Une simulation effectuée avec le logiciel ADAMS (Mechanical Dynamics), montre des modes d'oscillations des ressorts qui n'existeraient pas si l'hypothèse (1) était strictement vérifiée.

■ L'hypothèse 2 (constance de la force de déploiement de l'absorbeur d'énergie) est bien vérifiée dans le cas des deux derniers essais, effectués avec un type d'absorbeur d'énergie actuellement en cours de développement. Il n'en est pas nécessairement ainsi, même en moyenne, avec les absorbeurs d'énergie commerciaux. Les courbes efforts-allongements peuvent être considérées, en première approximation, comme résultant de la somme d'une composante, faisant suite à une montée progressive de l'effort sur quelques centimètres, d'une composante alternative d'amplitude de longueur d'onde voisine de 30 mm et d'une autre composante alternative de longueur d'onde voisine de 5 mm. Ces deux dernières composantes

donnent lieu à des excitations vibratoires du système de fréquences exprimées en hertz respectivement égales à $V(t)/0,03$ et $V(t)/0,005$, $V(t)$ étant la vitesse d'allongement de l'absorbeur. Les réponses du système à ces excitations vibratoires sont de faible amplitude tant que les fréquences excitatrices sont très supérieures aux fréquences de résonances du système ligne de vie/ équipement de protection. En pratique, ceci a lieu tant que $V(t)/0,03$ et $V(t)/0,005$ sont très supérieures à 10 hertz, soit respectivement lorsque $V(t) > 0,3$ m/s et $V(t) > 0,05$ m/s. En fin d'élongation, c'est-à-dire lorsque la vitesse d'allongement de l'absorbeur tend vers zéro, des résonances du système peuvent apparaître et causer des surcharges du rachis. L'absorbeur d'énergie en cours de développement, utilisé dans les deux derniers essais, vise à supprimer ces inconvénients.

Les variations de la composante moyenne de la force de déploiement vont nécessairement donner lieu à un mode de vibrations du système. Nous ne pouvons cependant dire si ceux mis en évidence sur la figure 6 proviennent d'une telle variation ou s'il sont induits par les masses en mouvement de la ligne de vie.

■ L'hypothèse 3 (comportement élastique et linéaire du harnais) est bien vérifiée en statique et probablement aussi en dynamique. Son élongation, de l'ordre de quelques centimètres, est peu sensible sur la valeur de D.

■ L'hypothèse 4 (comportement élastique avec allongement initial de la longe) n'est vérifiée qu'en première approximation sur un domaine limité d'allongements. Les caractéristiques K_1 et Δl_0 obtenues par linéarisation de la courbe efforts-allongements de la longe changent avec la force de traction maximale ; mais ceci n'a pas une influence déterminante sur les résultats, le terme $F_M/2K_1$ n'apportant à la distance d'arrêt D qu'une contribution de 30 %.

■ L'hypothèse 5 (comportement élastique et linéaire des ressorts) n'est vérifiée qu'en toute première approximation, même avec les ressorts garnis intérieurement de téflon. La valeur de raideur introduite dans les calculs est une valeur moyenne sur le domaine de variations de T. Le bon accord entre les valeurs de x et celles calculées de θ_M laisse supposer que la valeur adoptée de K est globalement représentative de la réalité.

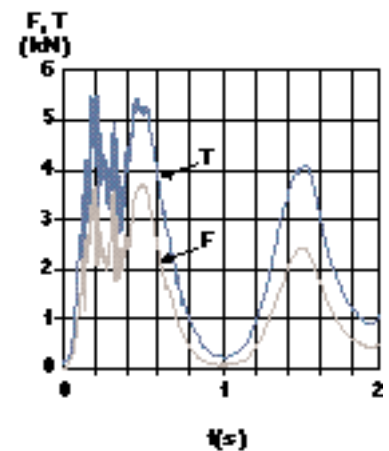


Fig. 6. Essais dynamiques de la ligne de vie. Variations des efforts de traction dans la longe F et dans le câble T en fonction du temps (essai n° 1 du tableau IV)

■ L'hypothèse 6 (comportement élastique et linéaire du câble) est bien vérifiée, mais la contribution à la raideur résultante de la ligne de vie est, dans le cas présent, négligeable.

■ L'hypothèse 7 (dissipation nulle d'énergie dans les composants du système à l'exception de l'absorbeur d'énergie) n'est pas vérifiée. Cependant, les sièges de dissipation d'énergie hormis l'absorbeur, sont les ressorts de la ligne de vie et la longe. D'après les courbes efforts-allongements statiques des ressorts, l'énergie dissipée en leur sein serait de 200 J, soit 7 % de l'énergie totale de la chute. Cette dissipation devrait causer un raccourcissement de la distance d'arrêt de 4 cm environ, du même ordre que celui de la longe, dû à la dissipation d'énergie en son sein. Ces valeurs sont suffisamment faibles pour pouvoir être négligées et ce d'autant plus que la composante élastique de l'allongement de l'absorbeur d'énergie l'a été. La distance d'arrêt en est majorée ce qui va dans le sens d'une plus grande sécurité.

■ L'hypothèse 8 (travées égales) n'est pas restrictive. Si les travées ne sont pas égales ce qui est rarement le cas, il suffit de remplacer $1/n$ par P.

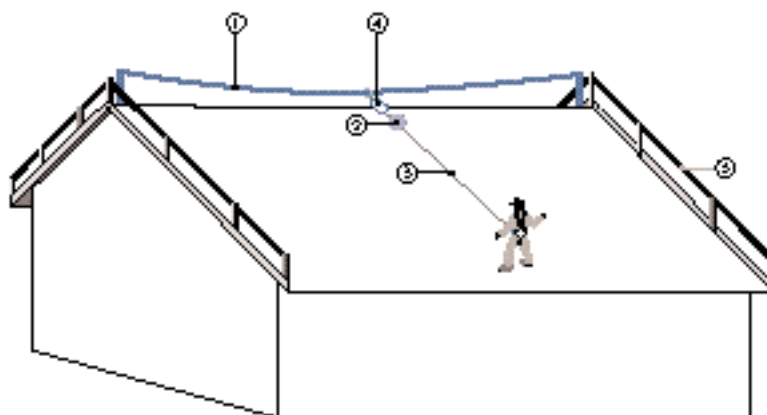


Fig. 7. Utilisation des lignes de vie sur toiture

- 1 - Ligne de vie.
- 2 - Enrouleur à câble
- 3 - Câble d'assurage
- 4 - Absorbant de choc
- 5 - Garde-corps

■ ■ **L'hypothèse 9** (ancrages indéformables) est probablement bien vérifiée étant données les dimensions de la structure d'accueil. Dans les cas pratiques, il est possible de tenir compte d'un déplacement élastique des ancrages sous l'action de la traction du câble, en ajoutant au dénominateur du second membre de la relation (17), l'inverse de la raideur résultante de ces ancrages.

Le désaccord entre les valeurs théoriques et expérimentales observé sur les deux premiers essais pourrait être dû à une diminution de la force de déploiement de l'absorbant. L'enregistrement des tensions du câble et de la longe (fig. 6) où l'on constate une diminution puis une remontée de la tension de celle-ci ne s'opposerait pas à cette hypothèse. Les enregistrements effectués au cours de l'essai 4 présentent cependant une allure voisine de ceux de l'essai 1 sans qu'il y ait de désaccord entre les valeurs théoriques et expérimentales de la distance d'arrêt. Les raisons exactes du désaccord observé dans les essais 1 et 2 entre les valeurs théoriques et expérimentales de la distance d'arrêt ne peuvent être réellement identifiées.

9. Utilisation rationnelle d'une ligne de vie sur toiture (fig. 7)

La longe doit constamment rester tendue pour limiter la hauteur de chute libre de l'intervenant à sa valeur minimale. La seule solution rationnelle pour y parvenir est d'utiliser, en guise de longe, un antichute à rappel automatique de câble, muni d'un absorbant d'énergie. Pour le confort de l'intervenant, il est préférable que le mécanisme enrouleur soit monté du côté de la ligne de vie. L'absorbant d'énergie sera placé de préférence entre celle-ci et le mécanisme de l'antichute. Le mou μ_m est calculé pour qu'en utilisation dans les conditions de pose de cette ligne de vie, le mécanisme enrouleur ne puisse venir au contact de la toiture et être endommagé au cours des déplacements de l'intervenant.

a - Il a été montré récemment [11] que la fiabilité du fonctionnement des anti-chutes à rappel automatique à sangle ne pouvait être garantie avec certitude par les essais de performance de la norme NF EN 360 [12]. Il importe donc d'éviter ce type d'équipement.

b - En cas d'intervention sur une toiture en matériaux fragiles, il faut tenir compte du fait que la longe rétractable, lors d'une chute qui surviendrait au travers de cette toiture, malgré les mesures prises pour respecter les exigences de l'article 159 du décret du 8 janvier 1965 [13], risque d'entraîner le découpage des éléments de couvertures, du point de rupture de ceux-ci jusqu'à la panne située immédiatement au dessus de ce point. Il faut alors tenir compte de l'augmentation de hauteur de chute que ce découpage peut entraîner.

CONCLUSION

Cet article décrit les deux grands types de lignes de vies : celles avec et celles sans dispositifs destinés à augmenter l'angle d'équilibre du câble. Il en recense les données nécessaires à la conception. Il indique les méthodes permettant d'en déterminer les caractéristiques des divers composants (câbles, ressorts et le cas échéant, les conditions de réglage (mou du câble)), en fonction de la résistance mécanique de la structure d'accueil. Il donne une méthode de calcul de la distance d'arrêt des chutes et en compare les résultats aux déterminations expérimentales. Cette distance d'arrêt, dans l'état actuel de la technique, est surtout utile à la détermination du tirant d'air minimal de sécurité. Il propose également des nuances de matériaux propres à assurer la pérennité de la ligne de vie. Il en recommande un mode d'utilisation rationnelle. Il indique enfin, les premiers résultats obtenus avec un nouveau type d'absorbant d'énergie à force de déploiement bien définie et constante. Le développement de tels dispositifs apparaît nécessaire pour supprimer les inconvénients des absorbants à déchirure, notamment les saccades du déploiement qui peuvent être préjudiciables à l'intégrité physique des utilisateurs et les variations de la force moyenne de déchirure. Ce nouveau type d'absorbant permettrait de mieux maîtriser la distance d'arrêt des chutes. Ultérieurement il serait possible de proposer une méthode de calcul permettant d'optimiser les lignes de vie.

Reçu en janvier 1997,
accepté en janvier 1998

BIBLIOGRAPHIE

1. Note annexe R167 à la Fiche technique R166 - Protection individuelle contre les chutes de hauteur dans le montage-levage des charpentes métalliques - Détermination des câbles assurant la sécurité des personnels des entreprises de montage-levage équipés de harnais. Paris, INRS, coll. *Recommandations de la CNAM*, déc. 1979, 8 p.
2. Note annexe R167 bis à la Fiche technique R166 - Choix et installation d'un câble d'assurance utilisable avec un équipement de protection contre les chutes. In : *op. cit.* [1].
3. MIURA N., SULOWSKI A.C. - Introduction to horizontal life lines. In : SULOWSKI A.C. (éd) - *Fundamentals of fall protection*. Toronto, International Society for fall protection, 1991, pp. 217-283.
4. ARTEAU J., LAN A. - Protection contre les chutes de hauteur. Conception de câbles de secours horizontaux. Québec, IRSST, coll. *Guides techniques*, 1991, 56 p.
5. ALAURENT R., ARTEAU J., CHUNG WING P., CORBEIL J.F., DESBOIS L., FORTIN D. et LAN A. - Conception de câbles de secours horizontaux. Québec, IRSST, 1992, 306 p.
6. PAUREAU J. - Chutes de hauteur. Modélisation simplifiée de quelques systèmes homme/dispositif de protection individuelle et d'évaluation des forces dynamiques internes. In : *Journée IMTL. Vandœuvre*, 7 avril 1994.
7. NF EN 355 - Équipement de protection individuelle contre les chutes de hauteur. Absorbants d'énergie. Paris - La Défense, AFNOR, mai 1993, 5 p.
8. PAUREAU J. - Diagnostic des lignes de vie. *A paraître*.
9. PAUREAU J. - Calcul des forces de choc sur les cordes d'assurance. *Revue Française de Mécanique*, 1996, 2, pp. 141-150.
10. NF S 71-022 - Équipements individuels de protection contre les chutes avec dénivellation. Paris - La Défense, AFNOR, décembre 1989, 21 p.
11. PAUREAU J. - Sûreté de fonctionnement de certains dispositifs anti-chutes à rappel automatique à sangle. Analyse théorique et résultats expérimentaux. In : *Symposium international sur la prévention contre les chutes et exposition associée*. Wuppertal, 15-18 septembre 1998.
12. NF EN 360 - Équipement de protection individuelle contre les chutes de hauteur. Antichutes à rappel automatique. Paris - La Défense, AFNOR, mai 1993, 6 p.
13. Hygiène et sécurité dans les travaux du Bâtiment, travaux publics et tous autres travaux concernant les immeubles. Décret du 8 janvier 1965 modifié par décret du 6 mai 1995. Paris, INRS, ED 535 / OPPBTP 181, 1997, 134 p.

ANNEXES | A | IV

A-I. ÉTABLISSEMENT DE LA RELATION (3)

L'allongement Δ du câble tendu sous l'action de la force T a pour expression :

$$\Delta = \frac{T}{K'} + \mu \quad (\text{A-I-1})$$

Cet allongement est lié à l'angle θ_M d'équilibre de la ligne de vie et à la longueur P de la travée par la relation :

$$P \left(\frac{1}{\cos \theta_M} - 1 \right) = \Delta \quad (\text{A-I-2})$$

En reportant l'expression (A-I-1) de Δ dans la relation (A-I-2), on obtient (compte tenu de la relation (1)) :

$$P \left(\frac{1}{\cos \theta_M} - 1 \right) = \frac{F_M}{2 \sin \theta_M K'} + \mu \quad (\text{A-I-3})$$

En multipliant les deux membres de la relation (A-I-3) par $\sin \theta_M / P$, on obtient, après réarrangement des termes :

$$\text{tg} \theta_M = \frac{P + \mu}{P} \cdot \sin \theta_M + \frac{F_M}{2K' P}$$

Lorsque la ligne de vie ne comprend pas de ressorts, θ_M se confond avec θ_μ et $K' = k/nP$. On obtient alors la relation :

$$\frac{F_M n}{2K} = \text{tg} \theta_\mu - \frac{P + \mu}{P} \cdot \sin \theta_\mu$$

A-II. ÉTABLISSEMENT DE LA RELATION (4)

La relation (A-I-3) peut se mettre sous la forme :

$$P(1 - \cos \theta_M) = \frac{F_M}{2K' \cdot \text{tg} \theta_M} + \mu \cdot \cos \theta_M$$

Après division des deux membres de cette équation par $F_M / 2 \text{tg} \theta_M$, en tenant compte de la relation (17) et en observant que $P = l/n$, on obtient la relation :

$$K = \frac{2}{1 \left[\frac{1 - \cos \theta_M}{n} - \frac{1}{k} - \frac{\mu \cdot \cos \theta_M}{2 \text{tg} \theta_M} \right]}$$

En multipliant le numérateur et le dénominateur du second membre de cette expression par k, on obtient :

$$K = \frac{2k}{1 \left[\frac{n_\infty}{n} - \left(1 + \frac{\mu k \cdot \cos \theta_M}{2 \text{tg} \theta_M} \right) \right]}$$

avec :



ANNEXES (suite)

$$n_{\infty} = k \cdot \frac{1 - \cos \theta_M}{2 \operatorname{tg} \theta_M} = \frac{2k \cdot (\operatorname{tg} \theta_M - \sin \theta_M)}{F_M}$$

Or :

$$\frac{\cos \theta_M}{\left(\frac{F_M}{2 \operatorname{tg} \theta_M}\right)} = \frac{1}{\left(\frac{F_M}{2 \sin \theta_M}\right)} = \frac{1}{T}$$

D'où l'expression :

$$K = \frac{2k}{1 \left[\frac{n_{\infty}}{n} - \left(1 + \frac{\mu k}{Tl}\right) \right]}$$

A-III. ETABLISSEMENT DE LA RELATION (6)

L'équation (A-I-3) peut s'écrire avec une approximation acceptable pour les valeurs de θ_M inférieures ou égales à 25° :

$$\frac{F_M}{2K' \cdot \theta_M} + \mu \cong P \cdot \frac{\theta_M^2}{2}$$

D'où :

$$\theta_M = \left[\frac{2}{P} \left(\frac{F_M}{2K' \theta_M} + \mu \right) \right]^{0,5} \quad (\text{A-III-1})$$

Or :

$$f = \frac{P}{2} \cdot \operatorname{tg} \theta_M \cong \frac{P}{2} \cdot \theta_M \quad (\text{A-III-2})$$

En multipliant les deux membres de l'équation (A-III-1) par P/2, puis en égalant le second membre de cette équation à celui de la relation (A-III-2), on obtient, après simplification et réarrangement des termes, l'équation :

$$\theta_M^3 - \frac{2\mu}{P} \cdot \theta_M - \frac{F_M}{P \cdot K'} = 0$$

A-IV. ETABLISSEMENT DE LA RELATION (19)

En divisant les deux membres de la relation (16) par Mg et en calculant dans cette expression δ en fonction des autres termes, on obtient, après avoir posé $z = F_M/Mg$, la relation :

$$(z - 1) \cdot \delta = f - \left(\frac{z}{2} - 1\right) \cdot \frac{F_M}{K_1'} - \frac{T^2}{2 \cdot M \cdot g \cdot K'} + H_{\text{eff}} \quad (\text{A-IV-1})$$

Or, d'après la relation (14) :

$$(z - 1) \cdot D = (z - 1) \cdot \delta + (z - 1) \cdot \left(f + \frac{F_M}{K_1'} \right) \quad (\text{A-IV-2})$$

En reportant l'expression (A-IV-1) de $(z - 1) \cdot \delta$ dans le second membre de l'équation (A-IV-2), on obtient la relation :

$$(z - 1) \cdot D = z \cdot \left(f + \frac{F_M}{2K_1'} - \frac{T^2}{2F_M \cdot K'} \right) + H_{\text{eff}}$$

Où :

$$\frac{T^2}{2F_M \cdot K'} = \frac{F_M}{8K' \cdot x^2}$$

d'après la relation (1) et en posant $x \cong F_M/2T$.