

# ESTIMATION ANALYTIQUE DE LA FIABILITE DES CABLES METALLIQUES DE LEVAGE : VALIDATION EXPERIMENTALE

H. MOURADI<sup>1</sup>, A. EL BARKANY<sup>2</sup> et A. EL BIYAALI<sup>3</sup>

Laboratoire de Génie Mécanique, Faculté des Sciences et Techniques, Université Sidi Mohamed Ben Abdallah  
Fès, Maroc

Emails : <sup>1</sup>houda.mouradi@gmail.com, <sup>2</sup>a\_elbarkany2002@yahoo.fr, <sup>3</sup>biyaali@yahoo.fr

## Résumé

Les câbles métalliques de levage sont des structures mécaniques complexes ayant des propriétés mécaniques énormes combinant une résistance axiale élevée, une raideur de torsion et une flexibilité de flexion. L'expérience industrielle montre que la rupture brutale d'une grande partie de ces câbles en service est généralement due aux dommages cumulatifs de leurs composants. Dans les activités de levage, on cherche avant tout une estimation de la durée de vie potentielle du câble afin de planifier et d'organiser des actions de la maintenance préventive et de pouvoir le changer au temps opportun.

Dans ce contexte, le présent travail a pour objectif de fournir une première étude expérimentale qui permet de valider le modèle théorique que nous avons précédemment développé qui estime la fiabilité du câble à divers niveaux d'endommagement de ses torons.

**Mots clés :** *câble métallique, nombre de torons rompus, fiabilité, fraction de vie, force ultime résiduelle.*

## 1. Introduction

Les câbles métalliques sont des structures dynamiques complexes composées de plusieurs éléments interconnectés ou interdépendants de sorte que l'état du système dépend des états de ses composants (fils, torons) (figure 1). De ce fait, toute approche de modélisation d'un câble métallique sera une approche multi-échelle où l'on peut distinguer l'échelle du fil, l'échelle du toron et celle du câble [1].



**Figure 1 :** Eléments constitutifs d'un câble métallique.

Grâce à leurs propriétés mécaniques (raideur de flexion et de torsion) et leur capacité de supporter des charges axiales importantes, les câbles métalliques ont été largement utilisés pour accomplir des tâches compliquées telles que le levage des charges, le haubannage des ponts suspendus, l'arrimage des structures flottantes, les ascenseurs... Malgré ces caractéristiques, les câbles en service sont sujet de plusieurs mécanismes de dégradation normaux ou anormaux qui peuvent se produire seuls ou en combinaison [2]. Ils sont soumis à des flexions répétées, des charges fluctuantes, des forces de contact internes, l'usure due à ces forces et des contraintes de contact élevées avec des poulies ou des tambours dont les conséquences directes sont les fortes modifications des caractéristiques géométriques et mécaniques des composants du câble. Il en résulte une réduction de la fiabilité du câble conduisant, éventuellement, à sa défaillance.

L'expérience industrielle montre que la rupture brutale d'une grande partie des câbles de levage en service est due le plus souvent à l'endommagement cumulatif de leurs composants, conduisant à des accidents graves. Les entreprises ont donc intérêt à éliminer ou à contrôler les risques d'accidents liés à l'utilisation de ces câbles afin d'assurer la sécurité du personnel et la bonne marche de leurs activités. Par conséquent, il est très important de prédire leurs comportements mécaniques avant leurs mises en service. Dans ce contexte, le présent travail a pour objectif de fournir une première étude expérimentale qui permet de valider le modèle théorique que nous avons précédemment développé [3]. Ce modèle qui est basée sur une étude multi-échelles et qui estime la fiabilité du câble à divers niveaux d'endommagement de ses torons.

## 2. Etude analytique du comportement d'un câble métallique

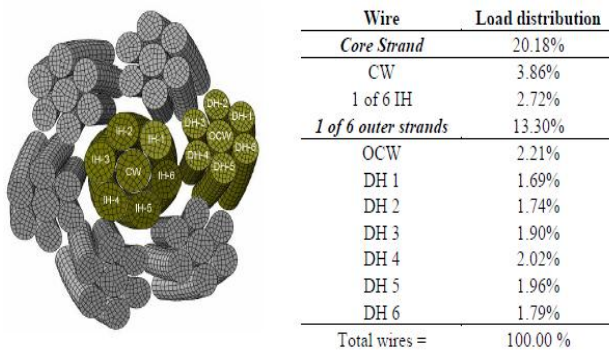
L'estimation de la fiabilité des câbles métalliques a été l'objet de différents travaux de recherche. Ainsi, plusieurs approches multi-échelles ont été proposées

dans la littérature. Parmi ces approches, nous nous sommes basés sur celle qui nous a apparut la plus logique et la plus adaptée aux conditions de fonctionnement des câbles, pour mener à bien notre propre étude. Cette approche multi-échelles [1] est basée sur un critère de défaillance qui est le nombre inacceptable de fils rompus dans le câble. Autrement dit, le seuil minimal de fils qui doivent être fonctionnels dans le câble. Dans ce modèle, le câble est considéré comme un système constitué d'un ensemble de torons disposés en série. Chaque toron est lui-même constitué d'un ensemble de fils torsadés disposés en un système logique majoritaire. Le choix de ce système série/logique majoritaire (LM) est justifié comme suit : Un fil rompu n'entraîne pas la défaillance du câble. Par contre à partir d'un certain nombre de fils rompus, le câble peut être déclaré défaillant (système logique majoritaire LM). D'autre part, les torons sont disposés en série, la défaillance de l'un de ces torons entraîne celle du câble. L'équation (1) présente la fiabilité d'un système série/logique majoritaire.

$$R = \left( \sum_{k=m}^n C_k^n R_i^k \cdot (1 - R_i)^{n-k} \right)^p \quad (1)$$

Avec  $p$  : nombre total des torons;  $n$  : nombre total des fils et  $m$  : le seuil minimal du nombre de fils fonctionnels.

D'après une étude par éléments finis réalisée dans [4] où les auteurs fournissent une répartition des pourcentages des charges supportées par les fils et les torons d'un câble métallique. Ils ont conclu que le toron central (l'âme centrale) supporte une charge axiale de l'ordre de 20,18% et chaque toron extérieur supporte 13,30% de la charge axiale appliquée (figure 2).



**Figure 2 :** Répartition des pourcentages des charges supportées par chaque élément du câble de 6 torons [4].

Dans cette figure, le câble étudié se compose de 6 torons. Or, la plupart des câbles utilisés dans les activités de levage se composent d'un nombre beaucoup plus important de torons. Donc dans ce cas là, la répartition de charge ne sera pas la même que celle-ci; le pourcentage de la charge supportée par chaque toron va être plus faible que 13,30%. D'après cette analyse, nous avons déduit qu'un câble de levage ne peut pas être déclaré défaillant dès la rupture d'un seul toron comme c'était mentionné dans le modèle précédent (série/LM).

Donc les torons ne peuvent pas être montés en série dans le câble. Chose qui nous a incitées à proposer une autre modélisation en faisant des modifications à ce modèle.

Notre modèle multi-échelles [3] qui se base aussi sur la méthode des systèmes blocs considère le câble comme un système logique majoritaire LM/ parallèle. Le choix de ce système est justifié par : Un toron rompu n'entraîne pas la défaillance du câble. Par contre à partir d'un certain nombre de torons rompus, le câble peut être déclaré défaillant. Le système est donc logique majoritaire. D'autre part, Lorsqu'un fil se rompt, les efforts de frottement qu'exercent sur lui les éléments voisins lui permettent de récupérer sa charge nominale à partir d'une certaine distance de la rupture, appelée longueur de ré-ancrage. Donc on peut dire que les fils sont montés en parallèle entre eux. L'équation développée (2) présente la fiabilité du système logique majoritaire/ parallèle.

$$R = 1 - \left( 1 - \sum_{k=m}^n C_k^n R_i^k \cdot (1 - R_i)^{n-k} \right)^p \quad (2)$$

Avec  $p$  : nombre de fils;  $n$  : nombre total des torons et  $m$  : le seuil minimal du nombre des torons fonctionnels.

Pour mener une étude comparative de la fiabilité selon les deux modèles, nous nous sommes basés sur l'équation suivante de la fiabilité ( $R$ ) en fonction de la fraction de vie ( $\beta$ ) [3] :

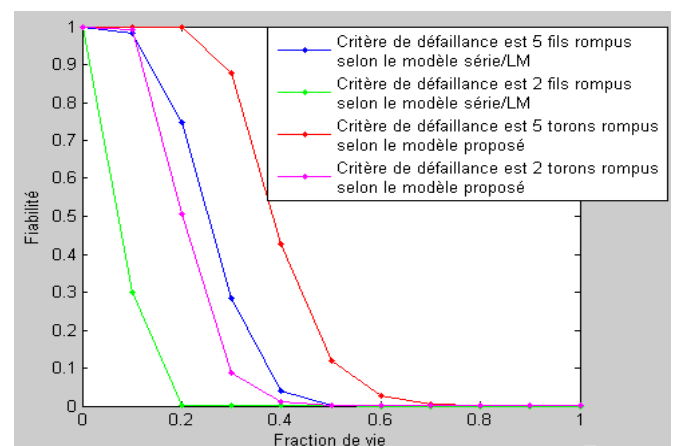
$$R(\beta) = \exp(-(\beta)^\lambda) \quad (3)$$

Avec  $\lambda$  est le facteur de forme de la loi de weibull.

Ainsi, l'équation (2) devient :

$$R(\beta) = 1 - \left( 1 - \sum_{k=m}^n C_k^n (\exp(-(\beta)^\lambda))^k \cdot (1 - (\exp(-(\beta)^\lambda)))^{n-k} \right)^p \quad (4)$$

La figure 3 illustre la comparaison des deux modèles série/LM et LM/parallèle.



**Figure 3 :** Fiabilité en fonction de la fraction de vie selon les deux modèles.

Cette étude nous a permis d'associer à chaque stade d'endommagement du câble la fiabilité correspondante. Ici on a pris deux exemples ; 5 et 2 fils rompus pour le modèle série/LM et 5 et 2 torons rompus pour le modèle

proposé. On remarque que les courbes représentatives du modèle série/LM décroît plus rapidement par rapport aux courbes du modèle proposé. Ceci est dû à la sévérité du critère de défaillance du modèle série/LM. Par ailleurs, le modèle proposé se situe entre un système série où le critère de défaillance est sévère (aucune rupture de toron n'est tolérée) et un système parallèle où aucun critère n'est pris en considération (le système reste fonctionnel jusqu'à la rupture du dernier toron).

### 3. Résultats expérimentaux

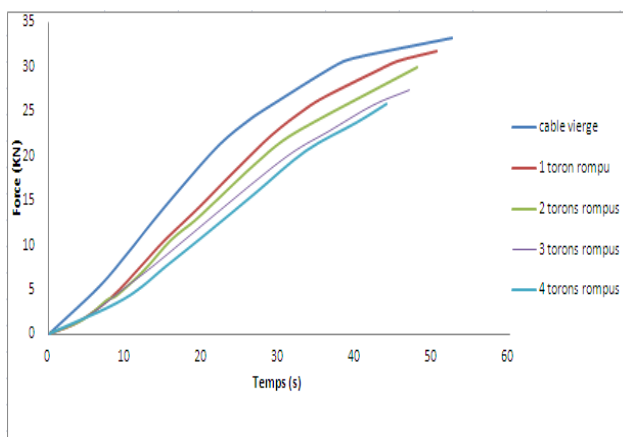
Le câble étudié est de type 19\*7(19 torons 7 fils) de construction antigiratoire (1\*7 + 6\*7 + 12\*7) à âme métallique et de diamètre de 7 mm, sa charge de rupture est de 33KN et la longueur d'essai (entre manchons) est de 600mm (figure 4).



**Figure 4:** Câble antigiratoire de type 19\*7

Les essais de traction ont été effectués dans le laboratoire à l'aide de la machine de traction MTS critérium de capacité de 1000 KN.

Une première étude expérimentale a été effectuée sur des échantillons de câbles vierges, d'autres qui ont un toron rompu, 2 torons rompus, 3 torons rompus et 4 torons rompus (figure 5). L'objectif de ces essais est de trouver la force ultime résiduelle que peut supporter ces échantillons présentant un certain nombre de torons rompus et donc de savoir si la rupture d'un seul toron affecte la fiabilité du câble ou non. Autrement dit, pour vérifier si les torons sont disposés en série comme c'était mentionné dans le modèle série/LM [1].



**Figure 5 :** l'évolution de la force résiduelle (KN) pour différents nombres de torons rompus dans le câble 19\*7.

D'après cette figure, on remarque que la rupture de 4 torons n'a pas affecté la résistance du câble. En effet, la

force ultime résiduelle de l'échantillon de câble avec 4 torons rompus est de 26 KN, c'est-à-dire, elle est diminuée de 2 % par rapport à la charge de rupture du câble vierge. Donc nous avons conclu que dans le câble, les torons ne sont pas montés en série mais en un système logique majoritaire comme on a mentionné dans le modèle développé. Cela veut dire qu'à partir d'un certain nombre de torons rompus, le câble peut être déclaré défaillant. Dans ce contexte, Nous allons continuer nos expérimentations accompagnées des études analytiques pour aboutir à l'instant où le nombre de torons rompus devient critique pour le câble. C'est-à-dire pour la détermination du stade de la fraction de vie critique et donc pour intervenir à temps par une maintenance prédictive du système.

### 4. Conclusion

Dans ce travail, nous avons montré que dans un câble métallique, les torons sont disposés en un système logique majoritaire comme on l'a mentionné dans le modèle proposé. Cela veut dire que la rupture d'un seul toron n'entraîne pas la défaillance du câble. Reste à identifier le nombre critique de torons rompus dans le câble. Autrement dit le seuil minimal des torons qui doivent être fonctionnel dans le câble pour assurer la sécurité des opérations de levage.

### Références

- [1] A. Meksem, M. El Ghorba, A. Benali and A. El barkany, *Optimization by the reliability of the damage by tiredness of a wire rope of lifting*. Applied Mechanics and Materials. 61, (2011), pp. 15-24.
- [2] Argatov II, X. Gomez, W. Tato, M.A. Urchegui, *Wear evolution in a stranded rope under cyclic bending: Implications to fatigue life estimation*, Wear, 271, (2011), 2857–67.
- [3] H. Mouradi, A. El barkany and A. El biyaali, *Reliability Estimation of Non-rotating ropes Based on Cumulative Damage*, International Journal of Performance Engineering, Vol. 12, No. 5, (2016), pp. 471-480
- [4] C.E. İmrak and C. Erdönmez, *On the problem of wire rope model generation with axial loading*, Mathematical and Computational Applications, Vol. 15 No. 2, (2010), pp. 259-268.