

## Comportement mécanique et évolution du dommage des différents éléments constituant un câble métallique de levage

Mouhib Nadia<sup>1,2</sup>, Sara Sandabad<sup>1,2</sup>, Lahlou Mohammed<sup>1</sup>, El Ghorba Mohamed<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ecole Nationale Supérieure d'Electricité et de Mécanique (ENSEM), Laboratoire de Contrôle et Caractérisation Mécanique des Matériaux et des Structures (LCCMMS), Oasis Route d'El Jadida, BP 8118, CASABLANCA (Maroc).

<sup>2</sup> Institut Supérieur d'Etudes Maritimes, Km 7 Route d'El Jadida Casablanca Maroc, Casablanca, Maroc

[mouhib.nadia@gmail.com](mailto:mouhib.nadia@gmail.com)

### Résumé :

Les câbles métalliques sont soumis à plusieurs mécanismes d'endommagement. Ces mécanismes peuvent s'activer simultanément sur une même zone de câble et interagir en entraînant la rupture prématurée de fils constitutifs causant ainsi des accidents graves dus notamment à la rupture brutale et inattendue de ces câbles. Dans le cadre de cette problématique, cette étude s'intéresse au comportement mécanique de câble et l'évolution de son dommage en fonction des fils rompus. Dans le but d'une caractérisation multi-échelles, des essais mécaniques ont été réalisés sur des assemblages de taille variable, allant du câble passant par le toron arrivant au plus petit de leurs composants, le fil. En effets, les résultats expérimentaux sont présentés dans ce travail divisés en trois sections principales selon les trois échelles étudiées. Les résultats ont montré que les câbles métalliques de levage ont un comportement élastique du à l'écrouissage provoqué par le tréfilage des fils de câble et aussi au pourcentage élevé de carbone qui leur confèrent une limite élastique très remarquable et par suite une haute résistance à la traction. Il a été remarqué également que l'âme centrale présente la plus grande résistance que ce soit au niveau du toron ou du fil. On peut dire que l'âme représente une partie importante dans la conception du câble et contribue d'une manière irremplaçable au support de la charge.

**Mots clefs :** Câble métallique, étude multi-échelles, comportement mécanique, fils rompus, dommage.

## 1. Introduction

Pour s'assurer de la fiabilité d'une structure, il est donc primordial de connaître le comportement mécanique du matériau à mettre en œuvre. De plus, l'endommagement que peut subir celui-ci durant sa phase de vie doit être quantifié en fonction des sollicitations appliquées. Les câbles métalliques à titre d'exemple, se caractérisent par une architecture très complexe. Le constituant de base du câble d'acier est le fil tréfilé [1]. Les fils sont alors torsadés pour former le toron, le câble est enfin fabriqué avec les torons, qui décrivent des hélices autour de l'âme lors de l'opération de câblage. Cette structure assez spéciale permet au câble de reprendre les charges malgré la rupture d'un ou plusieurs fils [2]. De plus, leur souplesse en flexion permet leur enroulement facile avant ou pendant leur utilisation. Néanmoins, cette conception des câbles qui présente de multiples avantages a aussi des inconvénients, puisque les conditions de sollicitations complexes peuvent engendrer des déformations ou des dégradations locales sans oublier leur sensibilité à l'environnement qui peut provoquer la corrosion des fils d'acier. L'objectif principal de la présente étude consiste à prédire le dommage des principaux éléments d'un câble métallique de levage de type 19x7, en se basant sur des essais expérimentaux de traction et par la suite déterminer la fraction de vie critique  $\beta_c$ . Une telle étude pourrait être bénéfique pour les industriels en raison de son faible coût et de sa rapidité.

## 2. Matériau et méthodes

### 1. Matériau

Notre approche consiste à étudier le comportement des éléments appartenant au câble métallique de levage de type 19x7 de constructions antigiratoire (le premier nombre fait référence au nombre de torons dans le câble et le second au nombre de fils par toron) (Figure1), le câble est de diamètre 7mm, composé de l'acier clair graissé, à âme métallique, croisé à droite, préformé, il est principalement utilisé comme câble de gréage pour tous les types de grues ainsi que pour l'exploration en haute mer grâce à son excellente résistance à la déformation.

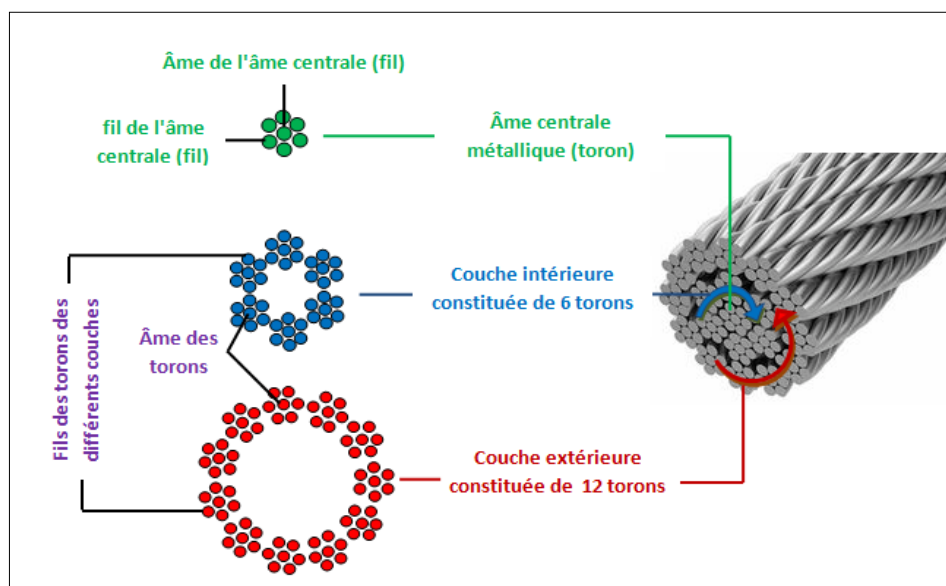


Figure 1. Câble métallique de levage de type 19x7 de construction antigiratoire

Les essais sont réalisés sur des éprouvettes de câble (Figure 2.a), toron (Figure 2.b) et fil (Figure 2.c), leur préparation est suivant les normes [3,4,5].

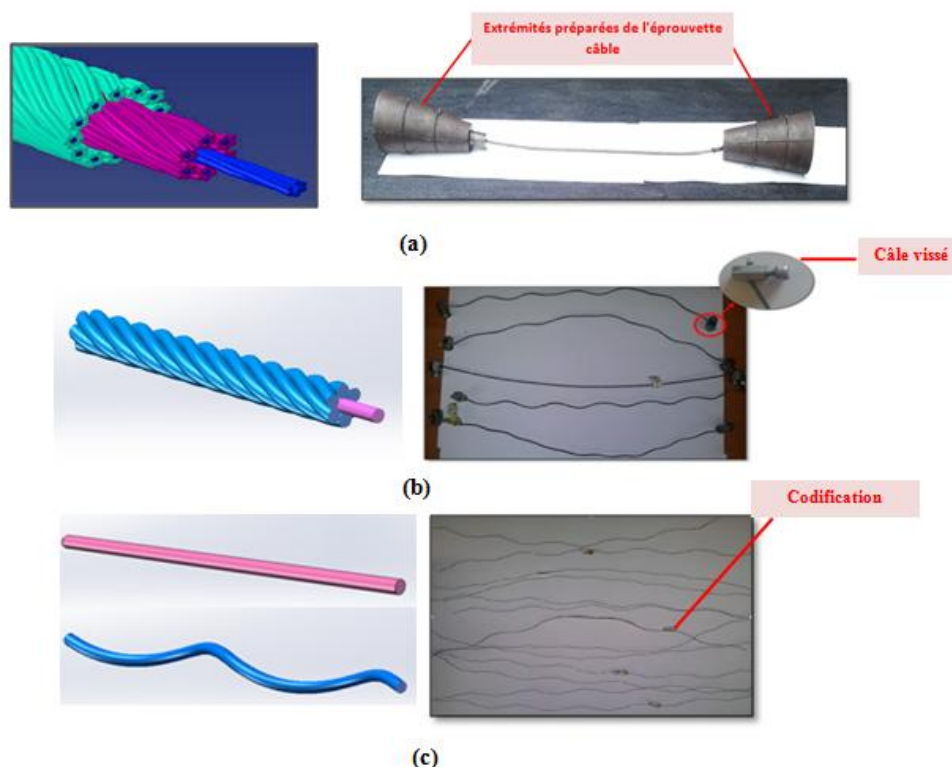


Figure 2. Dimensions des éprouvettes a) câble b) toron et c) fils

## 2. Méthodes expérimentales

La principale difficulté concernant les essais sur les câbles réside dans l'amarrage en compte de répartition d'effort appliqué sur tous les composants sans glissement et sans concentration de contrainte au niveau des mors de la machine qui entraînent une rupture prématurée lors de l'essai, donc la présence de pièces intermédiaires qui assurent la liaison entre le câble et les charges appliquées est nécessaire. Pour cela, le dispositif d'amarrage conçu pour câble tendu, comprend des mors de forme tronconique à l'intérieur desquels les mors coopèrent avec des logements (moules), présentant une portion tronconique complémentaire dans lesquels les extrémités du câble sont préalablement préparées avec du zinc fondu qui lorsqu'il pénètre les fils constituant, il prend cette forme conique (Figure 3.a). L'ensemble des éprouvettes a été testé à une température ambiante du laboratoire et selon les prescriptions et les directives de la norme internationale ISO 6892 [6].

Les torons étudiés sont constitués de 7 fils individuels, un fil central et 6 fils périphériques disposés en hélice autour du fil central. Des essais de traction ont été réalisés sur un lot de torons de l'âme centrale et d'autres sur un lot de torons hélicoïdaux appartenant à la couche intérieure et la couche extérieure du câble. Comme il a été mentionné auparavant, le but est de suivre le dommage du toron extrait d'un câble. Pour cela, des essais statiques ont été effectués sur des torons endommagés artificiellement à différents niveaux d'endommagement en coupant les fils constituant les éprouvettes torons (2,3,4 et 5 fils rompus d'un toron). Pour rompre les fils manuellement une pointe a été insérée prudemment à travers le nombre de fils à couper et les soulever minutieusement en tournant la pointe dans la direction de câblage pour les dégager (figure5) puis les couper au moyen d'une pince coupante diagonale.

Des essais statiques ont également été effectués sur tous les types de fils constituant à savoir: fils de l'âme centrale, l'âme de l'âme centrale, l'âme des torons et les fils des torons de la couche intérieure et la couche extérieure. Les essais ont été réalisés à l'aide d'une machine de traction universelle dénommée Zwick Roell de capacité maximale de 10KN pour les torons (Figure 3.b) et de 2.5KN pour les fils (Figure 3.c).

En vue d'obtenir des éprouvettes du toron et de fil, une longueur convenable a été coupée du câble. Les torons ont été décablés et les fils ont été détournés. La longueur minimale des échantillons est égale à la longueur d'essai plus celle nécessaire à l'amarrage. Par conséquent, une longueur de 300 mm a été prévue comme étant la longueur d'essai que ce soit pour les torons ou pour les fils. La tolérance de mesure en longueur est de  $\pm$  un millimètre pour l'ensemble des échantillons prélevés.

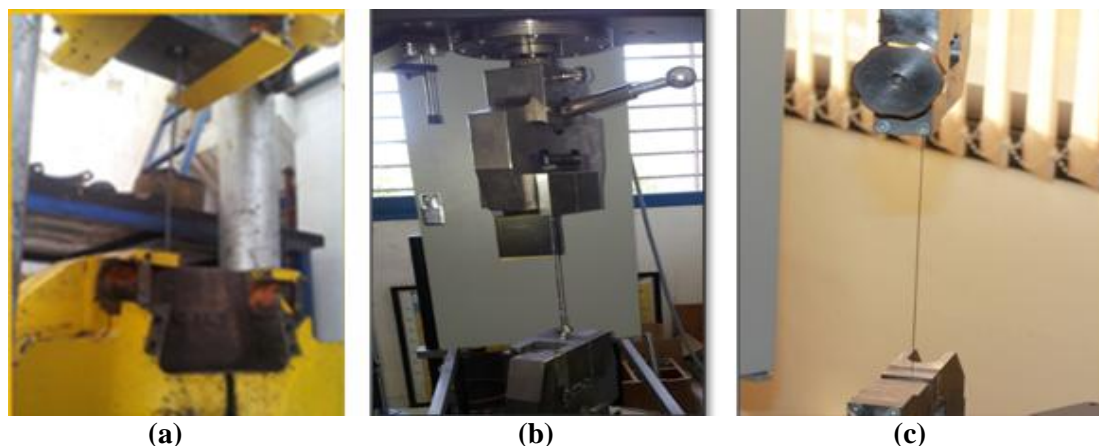


Figure 3. Montage des essais de traction a) câble b) toron c) fil

### 3. Résultat et discussion

#### 1. Résultats expérimentaux des câbles

La figure 4 présente l'évolution de la force appliquée sur l'éprouvette (en KN) en fonction du déplacement (en mm) du câble métallique de levage de type antigiratoire 19x7, de diamètre 7mm.

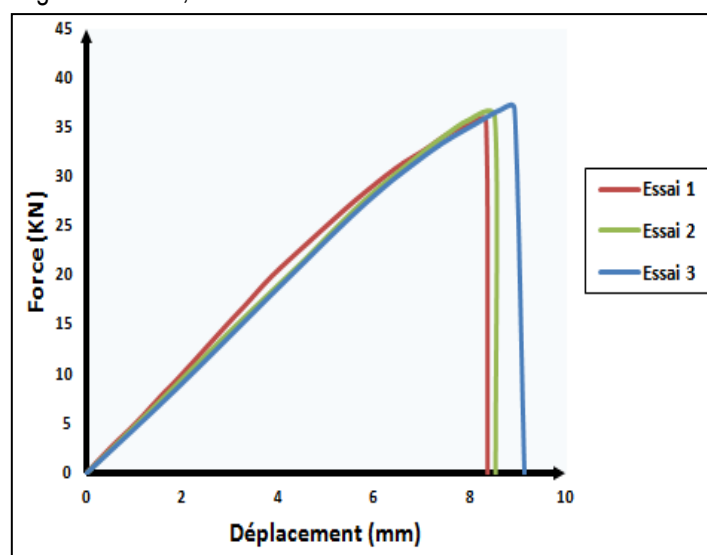


Figure 4. L'évolution de la force (KN) en fonction du déplacement (mm) du câble

On constate que les câbles métalliques de levage ont un comportement élastique. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que le câble de traction n'est pas infiniment rigide. L'écroutissage provoqué par le tréfilage des fils de câble permet de relâcher les contraintes internes dans le matériau et le pourcentage de carbone élevé, leur confèrent une limite élastique très remarquable et par suite une haute résistance à la traction. Les propriétés mécaniques extraites des résultats expérimentaux obtenus sont regroupées dans le tableau 1.

La formule (1) est utilisée pour calculer la section normalisée de câble 19 \* 7 [7] :

$$A_m = f \pi d^2 / 4 \quad (1)$$

Où:

**d**: est le diamètre du câble ;

**f**: coefficient du taux de vide entre les fils.  $f = 0,55$  pour les câbles multi-torons.

Le câble 19 \* 7 est un câble multi-torons donc la section normalisée sera égale à 21,16 mm<sup>2</sup>.

Tableau 1. Caractéristiques mécaniques du câble

Module de Young (GPa)	Limite élastique (MPa)	Contrainte maximale	Déformation (%)
161	1512	1708	1.37

## 2. Résultats expérimentaux des torons

### ➤ Caractérisation mécanique

L'ensemble des tests menant à la rupture des spécimens de torons prélevés d'un câble métallique de levage a permis de tracer l'allure de la courbe de traction qui représente l'évolution de la force appliquée sur l'éprouvette toron (N) en fonction du déplacement (mm) pour les deux types d'éprouvettes torons étudiées (âme centrale et toron hélicoïdaux)

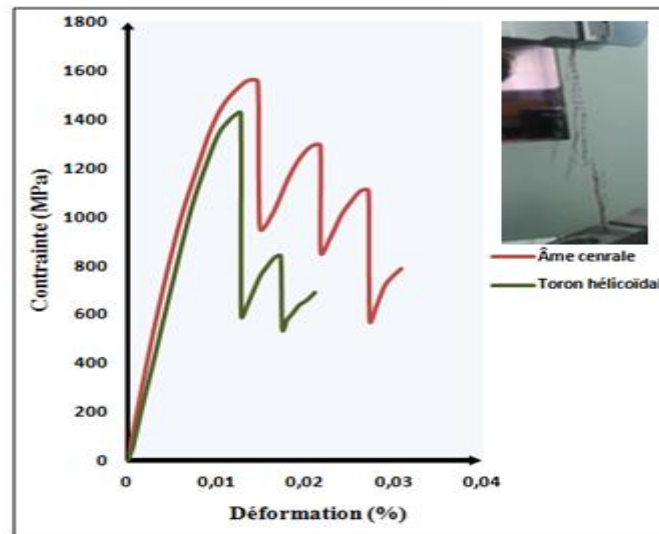


Figure 5. L'évolution de la force (N) en fonction du déplacement (mm) pour les torons

Il a été remarqué d'après la figure 5, que l'âme présente la plus grande résistance au niveau du toron. Elle représente donc une partie importante dans la conception du câble et participe au support de la charge. L'ensemble des tests menant à la rupture des spécimens de torons prélevés d'un câble métallique de levage a permis de tracer l'allure de la courbe de traction qui représente l'évolution de la force appliquée sur l'éprouvette toron (N) en fonction du déplacement (mm) (Figure 5) et par la suite extraire les caractéristiques mécaniques regroupées dans le tableau 2 (les valeurs données sont des valeurs moyennes).

Tableau 2. Caractéristiques mécaniques du toron

	Module de Young	Coefficient de Poisson	Limite élastique (0,2%)	Contrainte maximale	Contrainte à la rupture
Âme centrale	192 GPa	0,3	1425 MPa	1587 MPa	809 MPa
Toron hélicoïdal	189 GPa	0,3	1389 MPa	1417 MPa	742 MPa

Les résultats expérimentaux obtenus en fonction du nombre de fils rompus (0,2,3,4 et 5) sont donnés dans la figure 6. Les courbes de la figure décrivent en 3D l'évolution de la force (N) en fonction de déplacement (mm).

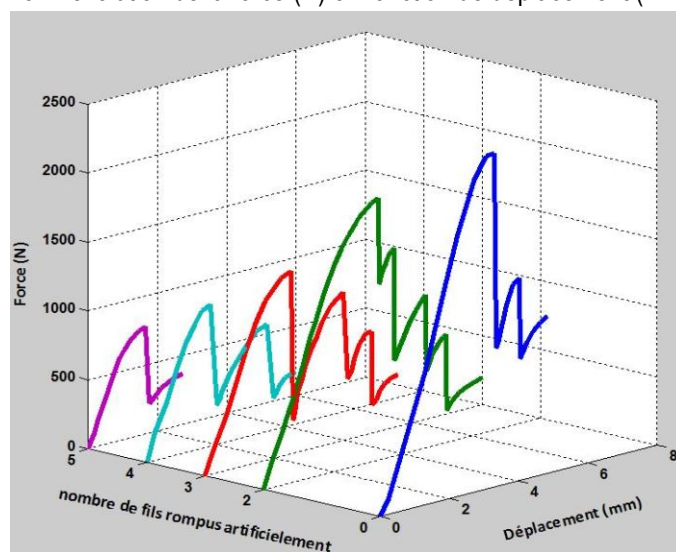


Figure 6. L'évolution de la force (N) en fonction du déplacement (mm) pour les différents niveaux d'endommagement



Lors de la réalisation des essais et selon les résultats montrés sur la figure 6, il a été constaté qu'un toron pré-endommagé possède une force ultime résiduelle qui chute à chaque rupture d'un fil constitutif puis reprend sa raideur, jusqu'à atteindre la valeur de rupture finale de l'éprouvette qui correspond à la rupture du dernier fil. Ceci peut être traduit par une perte de force du toron en fonction du nombre de fils rompus.

### ➤ Evolution du dommage statique-Fiabilité statique

Le modèle du dommage statique consiste à déterminer l'évolution de la force dont les variations sont dues essentiellement à l'endommagement. On quantifie alors le dommage statique par la variable  $D_s$  exprimée par [8]

$$D_s = \frac{1 - \frac{F_{ur}}{F_u}}{1 - \frac{F_a}{F_u}} \quad (1)$$

Avec :

$F_u$  : Valeur de la force ultime à l'état initial;

$F_{ur}$  : Valeur de la force ultime pour différents niveaux d'endommagement;

$F_a$  : Force juste avant la rupture qui correspond à la force du dernier fil.

L'évolution du dommage du toron est suivie à plusieurs niveaux de dégradation en commençant par son état vierge jusqu'à la rupture selon les conditions limites suivantes:

- À l'état initial  $\beta = 0 \longrightarrow F_{ur} = F_u \longrightarrow D = 0$
- À l'état final  $\beta = 1 \longrightarrow F_{ur} = F_a \longrightarrow D = 1$

La fiabilité varie en sens inverse du dommage. Intuitivement, il doit exister une relation entre ces deux paramètres. Ce qui nous permet d'écrire :

$$R_s(\beta) + D_s(\beta) = 1 \quad (2)$$

L'équation obtenue nous permet de tracer la courbe de variation de la fiabilité superposée avec celle de dommage pour les deux types de torons étudiés (l'âme centrale et le toron hélicoïdal)

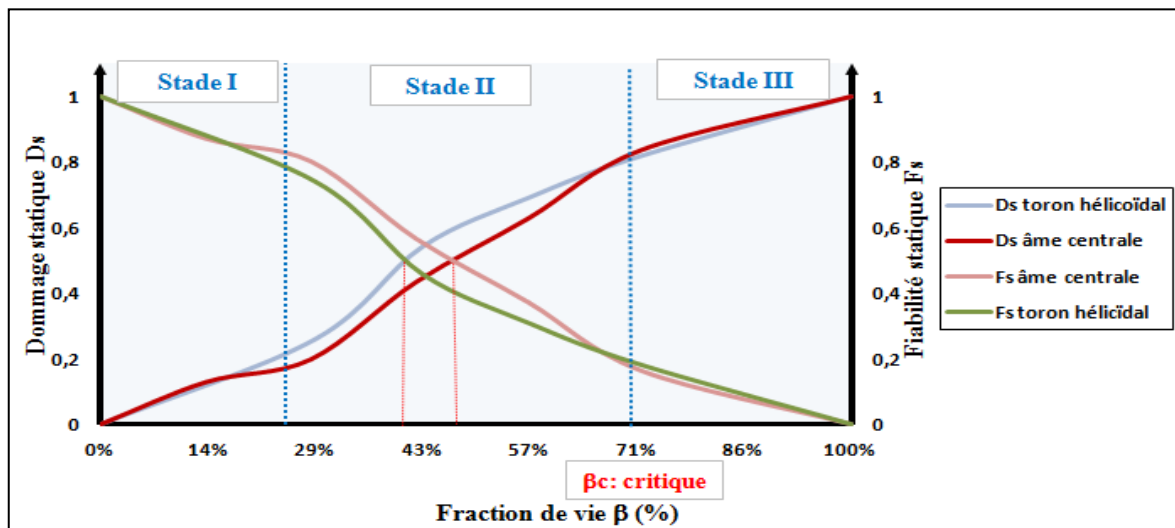


Figure 7. Superposition des courbes Dommage statique-Fiabilité statique

D'après la figure 7, l'intersection des courbes de dommage statique et fiabilité statique de l'ensemble des torons pré-endommagés à différents niveaux, nous a permis de déterminer le premier stade de dommage qui correspond à son initiation ; jusqu'à 2/7 fils rompus (28% d'endommagement) le dommage croît d'une manière assez lente. Puis le stade II qui se situe dans l'intervalle de  $\beta = [2/7, 5/7]$  équivalent à [28%, 71%] est déterminé à partir de 80% de dommage (20% de fiabilité) . Ce point d'intersection correspond à la fraction de vie critique  $\beta_c$  qui fait le pont entre le stade II de dommage progressif et le stade III où le dommage s'accélère de façon brusque et la rupture peut être brutale. Ce qui veut dire qu'à partir de 5/7 fils rompus le toron est inutilisable et une maintenance prédictive s'impose à l'industriel.

En comparant les deux courbes du dommage des deux types de toron appartenant au même câble, nous trouvons que les stades de l'évolution du dommage et de fiabilité sont identiques. Néanmoins, nous remarquons qu'au stade II le dommage s'accélère pour le toron hélicoïdal plus que pour l'âme centrale. Ce qui veut dire que la durée de vie de l'âme centrale est légèrement supérieure à celle des torons hélicoïdaux vu l'opération de câblage qu'ils ont subi lors de la fabrication et leur contact avec le milieu extérieur.

### 3. Résultats expérimentaux des fils

#### ➤ Caractérisation mécanique

Le fil étant l'élément de base du câble, une compréhension de son comportement s'avère de la plus haute importance. Pour cela, des essais de traction ont été réalisés sur les éprouvettes fils de différents types dans le but d'une caractérisation mécanique fiable. La figure 8 présente l'évolution de la force appliquée sur l'éprouvette en (N).

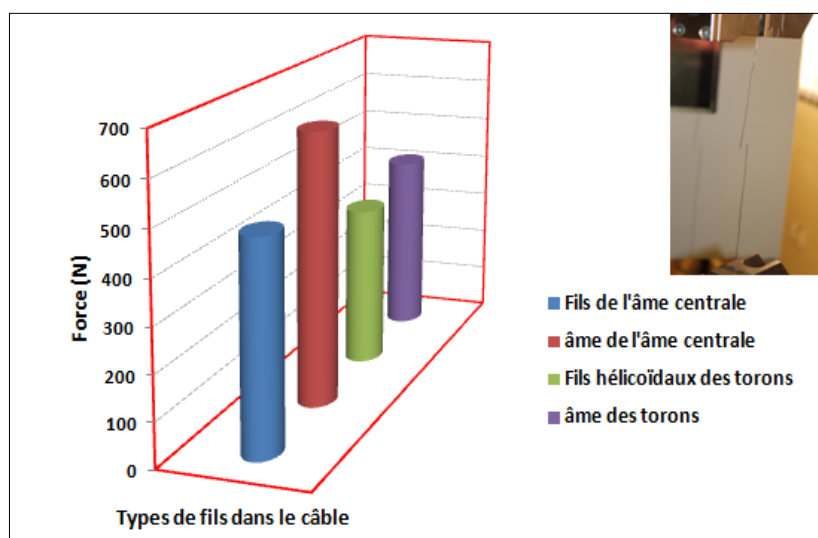


Figure 8. L'évolution de la force (N) pour les différents types de fils dans le câble

La même constatation concernant le toron a été faite pour le fil où on voit clairement que l'âme fil dans le toron présente la plus grande résistance grâce à son plus grand diamètre.

#### ➤ Evolution de Probabilité de survie-Probabilité de défaillance

En comparant la probabilité de survie et de défaillance des fils des torons hélicoïdaux avec celles des fils de l'âme centrale, on aura les résultats sur la figure 9 qui représentent la probabilité de survie et de défaillance en fonction de la fraction de vie  $\beta_w = F_u / F_0$ .

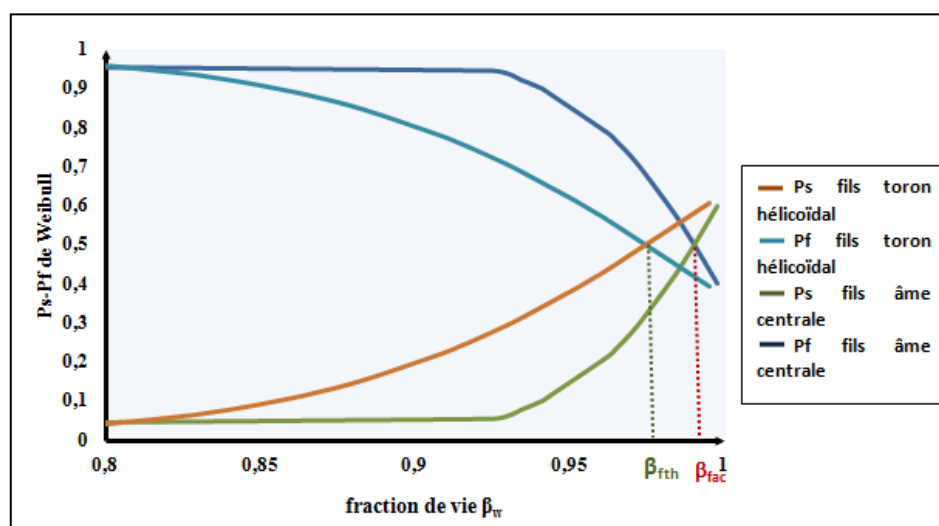


Figure 9. Probabilité de survie et de défaillance en fonction de la fraction de vie  $\beta_w = F_u / F_0$ .

Les fractions de vie critiques des fils toron hélicoïdal et fils âme centrale sont respectivement  $\beta_{fth} = 0,97$  et  $\beta_{fac} = 0,99$ . Ce qui a montré que la force maximale des fils de l'âme centrale est nettement supérieure à celle des fils des torons hélicoïdaux donc ils peuvent supporter plus de charges mécaniques. Il est à noter aussi que la fraction de vie critique des fils de l'âme centrale est supérieure ce qui leur donne une durée de vie supérieure.

## 4. Conclusion

Une étude statique du comportement mécanique des câbles métalliques de levage de structure antigiratoire ainsi que de ses composants a été établie. Les résultats obtenus ont montrés que le câble étudié a un comportement élastique ceci est due au processus de fabrication de ses fils tréfilés et aussi grâce à sa teneur en carbone qui leur confèrent une limite élastique remarquable et par suite une haute résistance à la traction.

Au niveau des torons extraits d'un câble métallique de levage (toron hélécoïdal et âme centrale) et suite aux différents endommagements artificiels provoqués (2,3,4 et 5 fils rompus), il nous a été possible de suivre l'évolution du dommage à chaque pourcentage d'endommagement en se basant uniquement sur des essais simples de traction. En effet, avec la relation Dommage-Fiabilité, trois stades de dommage ont été déterminés ; le stade I [0, 3/7] correspondant à l'initiation du dommage, le stade II [3/7, 5/7] correspondant au dommage progressif qui nécessite une maintenance prédictive et le stade III [5/7, 1] où le dommage est brutal donc le toron est déclaré défaillant. Par ailleurs, nous avons aussi constaté que l'âme présente la plus grande résistance que ce soit au niveau du toron ou du fil. On peut dire que l'âme représente une partie importante dans la conception du câble et participe au support de la charge.

## 5. Bibliographie

- [1] EN 10264-4: 2012. *Steel wire and wire products - steel wire for ropes - part 4: stainless steel wire*. ISSN 0335-3931: European Standard approved by CEN on 19 November 2011.
- [2] Canadian Centre for Occupational Health and Safety. Wire rope lifting. In February 2010.
- [3] Norme Européenne EN 12385-1 «Câbles en acier. Partie 1 : Prescriptions générales» 2002.
- [4] Norme Européenne EN 10218-1 «Fils et produits tréfilés en acier. Partie 1 : Méthodes d'essai» 1994.
- [5] Norme ISO 3178 (l'Organisation internationale de normalisation, Norme des Câbles en acier d'usages courants).
- [6] Norme ISO 6892 «Matériaux métalliques – Fils – Essai de traction» 1984.
- [7] Chouairi. A., Elghorba. M., Benali. A., Hachim. A. "Estimated loss of residual strength of a flexible metal lifting wire rope: Case of artificial damage" Recent Advances in Mechanical Engineering and Mechanics ISBN: 978-1-61804-226-2. 2014.
- [8] Bathias. C., Bailon. J. *La fatigue des matériaux et des structures*. pp. 328-330. 1980.