

Essai de traction sur un toron avec 3 fils artificiellement endommagés et prédiction de sa durée de vie

N.MOUHIB ^(a), H.OUAOMAR ^(b), M.LAHLOU ^(c), M. EL GHORBA ^(d)

a. 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). mouhib.nadia@gmail.com

b. 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). hanae.sup@gmail.com

c. 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). lahloumohammed89@gmail.com

d. 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). medelghorba2@gmail.com

Résumé :

Les câbles métalliques de levage sont exposés à divers processus de dégradation une fois déployé au service. Par conséquent, ils doivent répondre aux critères de sécurité les plus strictes au cours de leur utilisation. En effet, les moindres défaillances entraînent des dégâts matériels et immatériels. C'est la raison pour laquelle une surveillance préventive, un entretien régulier et une évaluation de la fiabilité s'avèrent d'une haute importance pour assurer une durée de vie maximale.

Tout au long de la vie utile d'un câble métallique, les fils et les torons qui composent ce câble sont soumis à des sollicitations mécaniques élevées indiquant une perte de la force originale, ce qui mène à des dégradations parfois très rapides conduisant à la rupture brutale.

L'objectif principal de cette étude consiste à prédire l'évolution du dommage d'un toron constituant un câble métallique, en se basant sur un essai expérimental de traction d'un toron contenant 4 fils endommagés artificiellement et par la suite déterminer les différents stades d'endommagement qui permettent de prévoir l'instant du dommage critique et donc d'intervenir à temps pour une maintenance prédictive du système.

Abstract :

Steel wire ropes are exposed to various degradation processes once deployed in service. Therefore, they must meet the strictest safety standards in their use because every failure cause material and immaterial damages. This is why preventive monitoring, regular maintenance and reliability assessment prove of great importance to ensure maximum life.

Throughout the life of a wire rope, the wires and strands that make up this cable are subjected to high mechanical stress indicating a loss of the original force, which sometimes leads to very rapid deterioration leading to sudden rupture.

The main objective of this study is to predict the evolution of the damage of a strand forming a steel wire rope, based on an experimental tensile test of a strand containing 3 wires artificially damaged and subsequently determine the different stages that predict the moment of critical damage and thus to intervene in time for predictive maintenance.

Mots clefs : câble métallique ; torons; fils ; dommage; rupture ; traction ; maintenance prédictive.

1 Introduction

Les câbles métalliques trouvent de nombreuses applications : le levage de charges, l'arrimage des structures flottantes, le haubanage des ponts, la précontrainte des constructions en béton, les téléphériques...

Ils 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 (figure 1). 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 quelques inconvénients, puisque la cadence de passage sur les appareils d'enroulement ainsi les accélérations et les décélérations nombreuses et successives peuvent engendrer des déformations ou des dégradations locales.

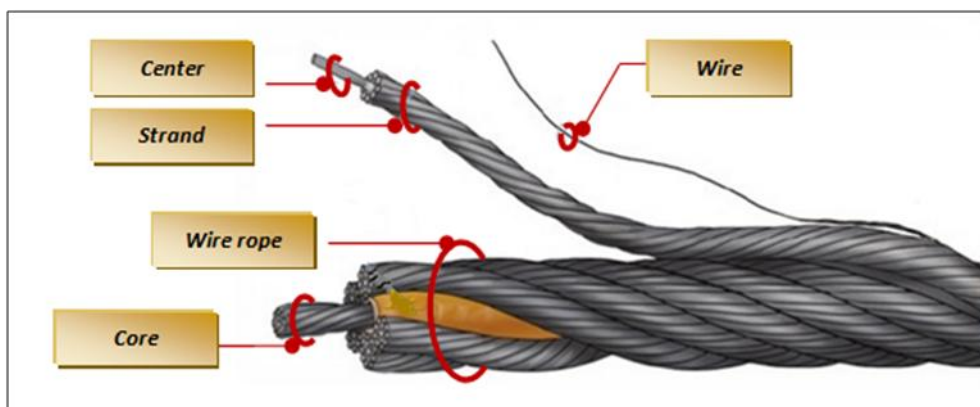


Figure 1. Eléments constitutifs d'un câble métallique

Au cours de l'essai de traction d'un toron avec 3 fils rompus artificiellement, nous avons constaté une chute de résistance à chaque rupture d'un fil constituant, d'où vient l'intérêt de notre étude qui consiste à prédire le dommage d'un toron endommagé, en se basant sur un essai expérimental de traction et par la suite déterminer la fraction de vie critique β_c , une telle étude pourrait être bénéfique pour les industriels en raison de son faible coût et de sa rapidité.

2 Matériau et expérimentation

2.1 Matériau

Notre approche consiste à étudier le comportement d'un toron appartenant au câble métallique de levage de type 19x7 de constructions antigiratoire (1x7 + 6x7 + 12x7) (figure2). Le câble est composé de deux couches de torons câblés en sens opposés, cette construction est généralement utilisée pour supporter une grande charge axiale avec des raideurs de flexion et de torsion comparativement petites.

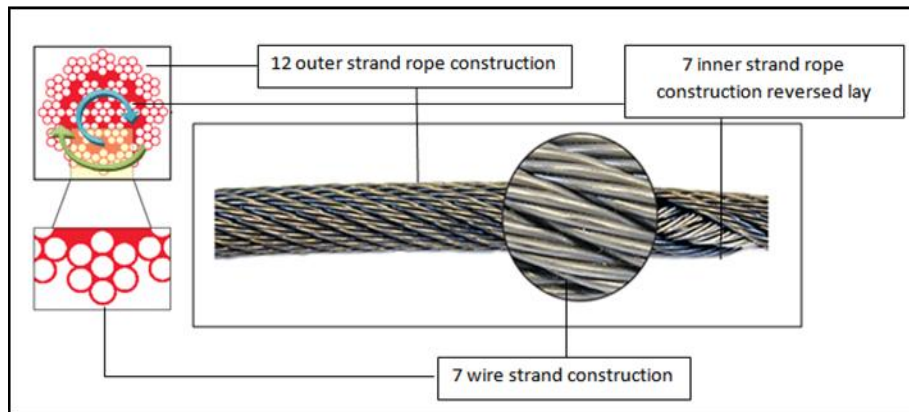


Figure 2. Câble métallique de levage de type 19x7 de construction antigiratoire

Les torons étudiés sont constitués de 7 fils individuels, un fil central et 6 fils périphériques disposés en hélice autour du fil central (voir Fig.3).

En vue d'obtenir des éprouvettes du toron, une longueur convenable a été coupée du câble et les torons ont été décablés. La longueur minimale de l'échantillon de toron 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 pour les torons. La tolérance de mesure en longueur est de \pm un millimètre pour l'ensemble des échantillons prélevés [3].

Les dimensions du toron sont montrées sur la figure 3 :

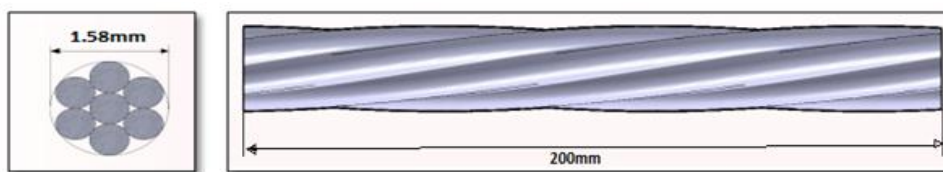


Figure 3. Dimensions du toron utilisé

2.1 Expérimentation

a) Composition chimique

La composition chimique est obtenue par l'analyse spectrométrique à l'aide d'un Spectromètre à étincelle de pointe, Le résultat obtenu est récapitulé dans le tableau 1

Tableau1. Composition chimique du matériau

Elements	C	Si	Mn	P	Cr	Mo	Ni
%	1,478	2,04	2	0,091	0,182	0,208	0,120

On remarque que le pourcentage de carbone est très élevé, ceci confère au câble une limite élastique très élevée et par suite une haute résistance à la traction.

b) Propriétés mécaniques

Pour extraire les propriétés mécaniques du matériau, des essais de traction ont été réalisés chez le Laboratoire Public de Essais et d'Etudes (LPEE) sur des éprouvettes de toron à l'état sain .

La fixation des échantillons est effectuée au moyen des cales vissées aux deux bouts du toron dans le but d'empêcher le glissement des échantillons au cours des essais.

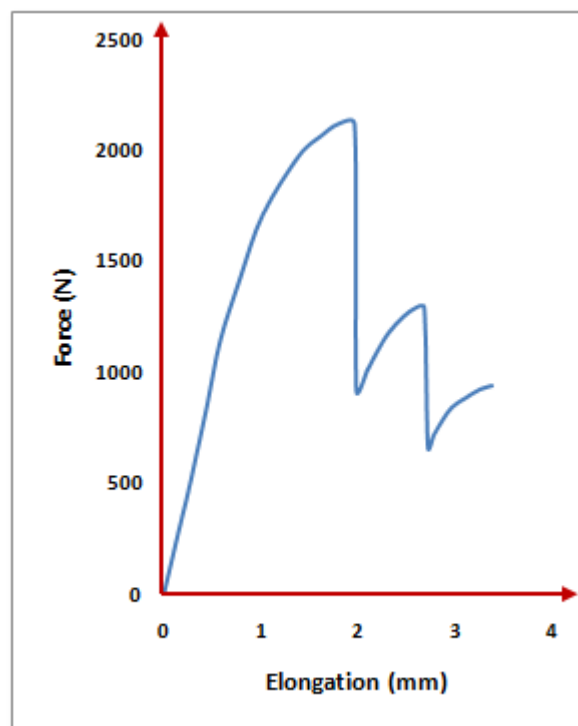


Figure 4. Courbe de traction pour un toron vierge

Les propriétés mécaniques des torons utilisés sont rapportées au tableau :

Tableau 2. Caractéristiques mécaniques du matériau

Module de Young	Coefficient de poisson	Limite élastique	contrainte maximale	Contrainte à la rupture
$E=189$ GPa	$\nu=0,3$	$\sigma_e=1035$ MPa	$\sigma_u=1207$ MPa	$\sigma_r=642$ MPa

3 Résultats et Discussion :

3.1 Essai statique sur les torons avec 3 fils rompus artificiellement

La courbe d'essai de la force appliquée en fonction de l'allongement pour le toron endommagé artificiellement avec 3 fils rompus, est donnée par la (figure.5).

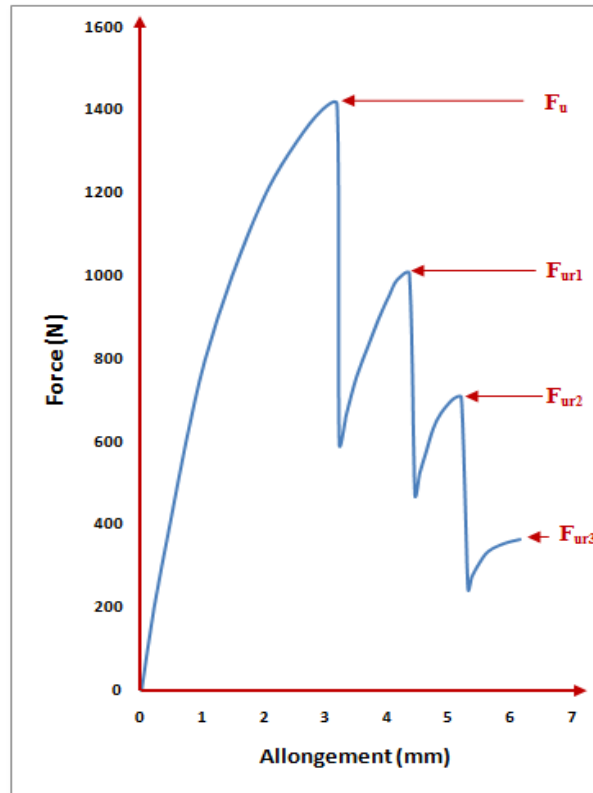


Figure 5. Courbe de traction pour un toron avec 3 fils rompus

Selon cette figure, on constate qu'un toron possède une force ultime résiduelle de 1415 N qui chute à chaque rupture d'un fil constitutif puis reprend sa raideur, jusqu'à atteindre la valeur de rupture finale correspondante au dernier fil du toron à 365 N. Ceci peut être traduit par une perte de résistance du toron en fonction du nombre de fils rompus. Les valeurs des forces ultimes résiduelles sont reportées au tableau 3.

Tableau 3. les valeurs des forces ultimes résiduelles

Fu	Fur1	Fur2	Fur3
1415	1006	707	365

3.2 Calcul du dommage statique Ds

Le modèle du dommage statique (Ds) consiste à déterminer l'évolution de la force dont les variations sont dues essentiellement à l'endommagement dans le même essai statique de traction. On quantifie alors l'endommagement par la variable Ds exprimée par :

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

Avec :

F_u : la valeur de la force ultime

F_{ur} : la valeur de la force ultime

F_a : la force juste avant la rupture

Au cours de l'essai, on suit le phénomène d'endommagement entre l'état initial à 2 fils endommagé artificiellement et la rupture complète de l'éprouvette par la mesure des forces ultimes résiduelles en fonction de la fraction de vie β qui correspond au rapport du nombre de fils rompus sur le nombre de fils total, ce phénomène est décrit par le paramètre de dommage D_s .

- A l'état initial et jusqu'à la rupture du premier fil à l'essai : $\beta = 4/7 \rightarrow F_{ur} = F_u \rightarrow D = 0$
- A l'état final $\beta = 1 \rightarrow F_{ur} = F_a \rightarrow D = 1$

La variation du dommage en fonction de la fraction de vie β est illustrée par la courbe

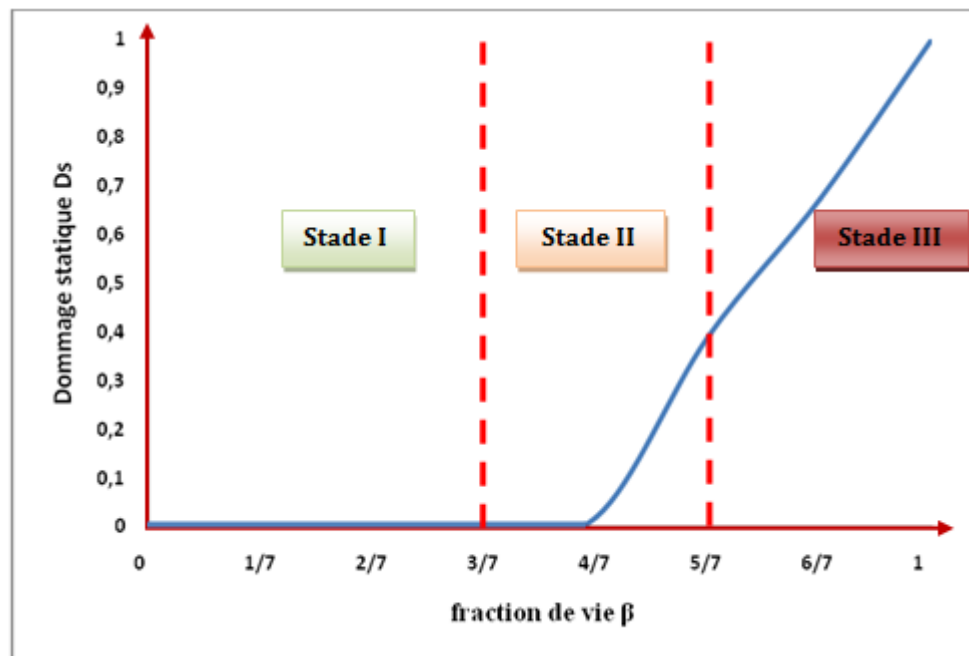


Figure 6. Évolution du dommage statique en fonction de la fraction de vie

L'accroissement du dommage signifie l'augmentation de la perte en résistance en traction statique des échantillons, cette perte évolue lorsque le nombre de fils rompus devient plus important. Il s'agit d'un endommagement fragile avec des déformations irréversibles qui réduit la résistance ultime du matériau.

De la figure 5, nous pourrions distinguer seulement les stades II et III (Déterminés à partir du dommage de toron à l'état vierge). Le stade II correspond à l'initiation du dommage élastique, et le stade III correspond aux dommages brutale. Cela indique qu'un toron avec 3 fils rompus se trouve dans la phase II de dommages, et à seulement à partir de 5/7 (fraction de la vie critique) fils rompus que le dommage du toron se trouve dans la zone instable. Alors, quand ces rapports adimensionnels sont atteints, une intervention devient nécessaire.

3.4 Calcul du dommage par théorie unifié

L'endommagement du toron étant progressif, sa variation est influencée en grande partie par le niveau du chargement. Les diverses théories représentatives de cet endommagement sont données par le modèle linéaire initié par la loi de Miner selon laquelle le dommage évolue linéairement en fonction de la fraction de vie [4].

Par analogie, avec la théorie unifiée, une relation empirique décrivant le dommage est proposée :

$$D = \frac{\beta}{\beta + (1-\beta) \left[\frac{\gamma - (\gamma/\gamma_u)^8}{\gamma - 1} \right]} \quad (2)$$

Où : $\beta = \frac{N_i}{N_f}$, $\gamma = \frac{F_{ur}}{F_0}$ et $\gamma_u = \frac{F_u}{F_0}$

F_0 est la limite d'endurance résiduelle qui est égale à la force ultime résiduelle multipliée par un coefficient α (pour $n=0$; $F_0 = \alpha F_u$).

Pour un coefficient

$$\alpha = \frac{1}{\text{Coefficient de sécurité du toron}}$$

Le coefficient d'utilisation des torons qui sont destinés à notre expérimentation est égal à 2,5.

La variation du dommage en fonction de β avec γ comme paramètre est illustrée à la figure 7. Chaque courbe est associée à un niveau de chargement.

Le dommage par théorie unifiée, calculé d'après la relation (2) en fonction de la fraction de vie β , est porté par deux courbes à la figure 7;

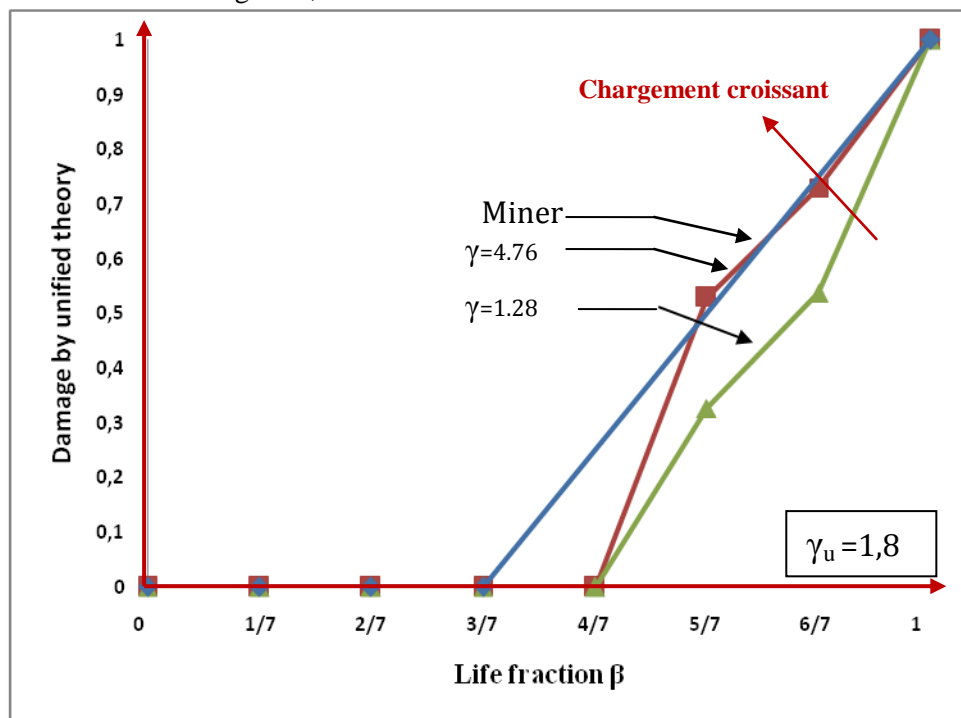


Figure 7. Évolution du dommage statique en fonction de la fraction de vie

Chaque courbe est associée à un niveau de chargement particulier. L'allure de chaque courbe de croissance suivant le sens de γ croissant. Cette courbe de dommage s'approche graduellement de la bissectrice en fonction de β pour des niveaux de chargements élevés.

3.5 Comparaison entre le dommage statique de force résiduelle et le dommage théorique par théorie unifiée

La superposition des courbes de dommage obtenues par la théorie unifiée et celle de dommage obtenue par la force résiduelle sont illustrées dans la figure 8 :

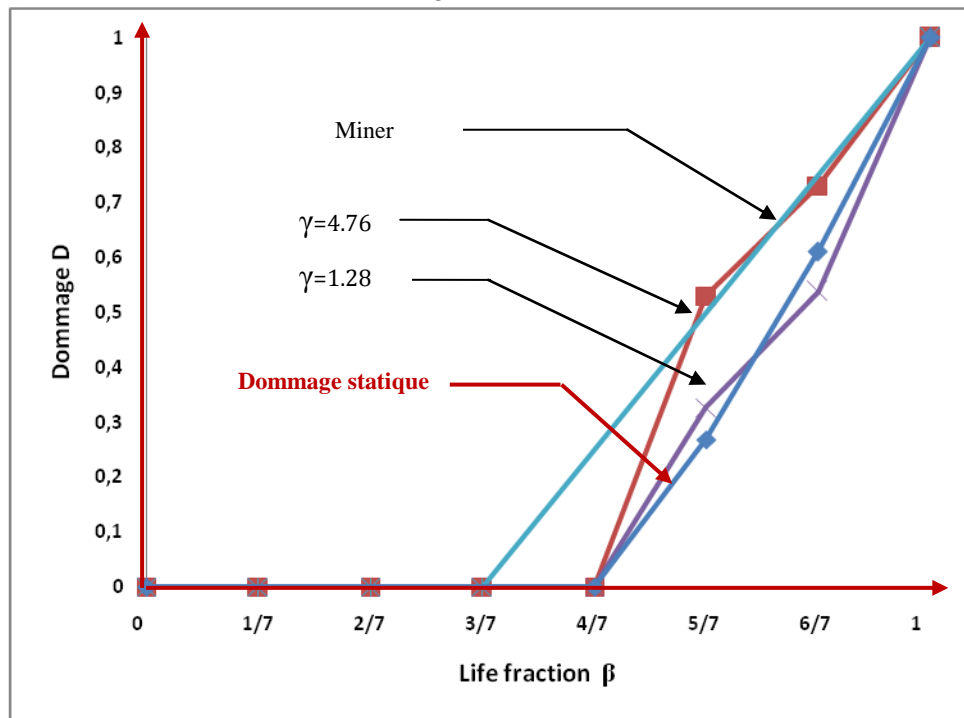


Figure 8. Comparaison du dommage théorique selon la théorie unifiée et la loi de Miner avec le dommage statique

Nous constatons que la courbe du dommage théorique selon la théorie unifiée, pour un niveau de chargement $\gamma=1.28$, se rapproche de la courbe statique de la force résiduelle à la fin du stade II et au début du stade III (l'écart entre les deux courbes est négligeable).

4. Conclusion

Une étude de dommage et de fiabilité a été réalisée basée sur un essai statique de traction simple qui a permis d'estimer le dommage d'un toron extrait d'un câble métallique de levage de construction antigiratoire (19x7) dont 3 fils ont été rompus artificiellement.

Par la suite, on a pu déterminer des fractions de vie critiques, qui permettent de prévoir l'instant du dommage et donc d'intervenir au moment opportun.

L'écart entre la courbe théorique obtenue par la théorie unifiée et la courbe statique est négligeable, ce qui rend le modèle de la théorie unifiée plus proche de la réalité expérimentale des torons en acier.

A l'échelle industrielle, ces travaux trouvent leur intérêt dans toute entreprise qui utilise régulièrement ou occasionnellement les appareils de levage et qui ont comme objectif éviter les accidents du travail liés à l'utilisation des câbles à faible coût en se basant uniquement sur un essai de traction pour une maintenance prédictive du système.

Par ailleurs, il est aussi envisagé d'étudier le comportement d'un câble métallique entier avec pour seules données la géométrie du câble et le dommage du toron.

Références

- [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] A. Meksem, *Probabilistic approach and experimental characterization of the behavior of wire rope hoist*, Ph.D. Thesis, ENSEM, University Hassan 2, Ain Chock, Casablanca, 2010.
- [4] C. Bathias, J. Bailon, *La fatigue des matériaux et des structures*, pp. 328-330. 1980.