

## **Evaluation énergétique du comportement mécanique de l'âme centrale d'un câble métallique sous l'effet d'un chargement statique.**

**A. Wahid<sup>1,2</sup>, N.Mouhib<sup>2,3</sup>, F.Sabah<sup>1,2</sup>, A. Kartouni<sup>1</sup>, H.Chakir<sup>1</sup>, M.El Ghorba<sup>2</sup>**

1. Faculté des Sciences Ben M'sik Avenu Driss El harti, B.P.7955, Sidi Othmane Casablanca, Maroc

2. Laboratoire de Contrôle et Caractérisation Mécanique des Matériaux et des structures, B.P 8118, Oasis-Route El Jadida – ENSEM / Casablanca, Maroc

3.ISEM/ Institut Supérieur des Etudes Maritimes, Km 7 Route El Jadida Casablanca Maroc

E-Mail: [achraf.wahid90@gmail.com](mailto:achraf.wahid90@gmail.com)

### **Résumé :**

L'objectif principal de cette étude consiste à prédire l'évolution de dommage d'une âme centrale constituant un câble métallique de levage de type antigiratoire 19x7, en utilisant l'énergie de déformation déterminée par la méthode d'une intégrale numérique s'appuyant sur l'interpolation linéaire par intervalle. La méthode numérique ainsi utilisée est basée sur les résultats expérimentaux des essais simples de traction effectués sur des éprouvettes vierges et d'autres endommagés artificiellement, en cassant les fils constituant des échantillons à différents pourcentages.

Les résultats obtenus ont permis d'évaluer le comportement énergétique de l'âme centrale soumise à des charges statiques et par la suite prédire l'évolution du dommage. En effet, il nous a été possible de déterminer trois stades d'endommagement qui permettent de prévoir dans un premier temps l'initiation du dommage puis l'instant de son accélération où une maintenance prédictive s'impose.

La présente étude comporte également une corrélation entre deux méthodes de calcul de dommage, une méthode semi-empirique a été proposée par analogie avec la théorie unifiée et une méthode de calcul de dommage statique, et ceci par analogie au comportement cyclique.

**Mots clefs :** âme centrale, câble métallique, Energie de déformation, Comportement mécanique, Endommagement.

## 1. Introduction

les câbles en générale sont des structures hiérarchiquement complexes , ayant une capacité de supporter une grande charge axiales avec des raideurs de flexion et de torsion comparativement petite [1] .ils possède une limite d'élasticité importance et une haute résistance à la traction tout en restant suffisamment souples pour être enroulés avant et après la rupture [2].

L'ensemble de ces propriétés rend le câble un élément essentiel et utilisable dans de nombreux ouvrages industriels [3] tels que le levage des charges, l'arrimage des structures flottantes, le haubanage des ponts, les téléphériques, l'industrie minière et bien d'autres..etc .

Contrairement à l'autre éléments structurels comme les barres, les câbles sont formés par plusieurs éléments constitutifs [4]. Ils sont généralement constitués d'une âme centrale qui représente le cœur d'un câble métallique sur laquelle s'enroulent plusieurs torons.

Les torons aussi sont des assemblages de fils métalliques enroulés hélicoïdalement autour d'un fil central qui représente le constituant de base du câble et qui est obtenu par tréfilage. Leur composition (multi-constituants) confère également aux câbles une bonne sécurité.

l'objectif de notre travail est de prédire le dommage de l'âme centrale (toron ) extraire d'un câble métallique de levage de type 19\*7. Pour ce faire ,on a calculé dans un premier temps l'énergie de déformation après chaque essai mécanique et par la suite on a procédé à l'évaluation du dommage lors des essais statiques en utilisant trois modèles d'endommagements par similitude au comportement d'un matériau soumis à des charges cycliques.

## 2. Théorie et calcul

### 2.1 théorie unifiée

Dans la continuité de ces travaux de dommage non linéaire Shanley [5], Henry[6], Gatts [7],et BUI-QUOC, T., et al [8] ont proposé une loi d'évolution du dommage non linéaire selon la formule suivante :

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

Par similitude au comportement du matériau soumis à des chargements cycliques, le toron possède une énergie de déformation ultime en traction statique  $U_u$ , cette énergie diminue d'une façon significative au fur et à mesure que le nombre de fils rompus au cours des essais augmente jusqu'à la rupture totale de l'éprouvette ( $U_{ur}$ ).C'est pour cela que nous avons traité une approche modifiée basée sur la théorie unifiée [9], en remplaçant le préchargement

cyclique par la création des dommages artificiels et en remplaçant les contraintes par l'énergie ultime.

## 2.2 Loi de dommage statique

Dans cette partie, on s'intéresse à la quantification de dommage statique, et à partir de la formule proposée par Erisman [10], on définit la fonction de dommage statique comme suit:

$$D = \frac{U_{ur}(\beta) - U_u(0)}{U_a(1) - U_u(0)} \quad (2)$$

D'autre part, en partant du module de DuiYe et Zhenlin Wang [11], nous avons développé un modèle pour étudier le pré-endommagement à partir d'essais statiques de traction en définissant le terme d'endommagement  $D$ , qui peuvent évoluer en termes de variation de l'énergie de déformation dissipée pour l'endommagement isotrope.

$$D = 1 - \frac{U_D}{U_u} \quad (3)$$

où :  $U_D$  et  $U_u$  sont respectivement l'énergie de déformation du matériaux préendommagé et d'un matériau sans pré-endommagement.

## 3. Résultats et discussions

L'ensemble des tests menant à la rupture des spécimens de l'âme centrale (toron) 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 (N) appliquée sur l'éprouvette toron en fonction du déplacement (mm) (figure1) et par la suite extraire les caractéristiques mécaniques et les regrouper dans un tableau.

### 3.1 Caractérisation mécanique

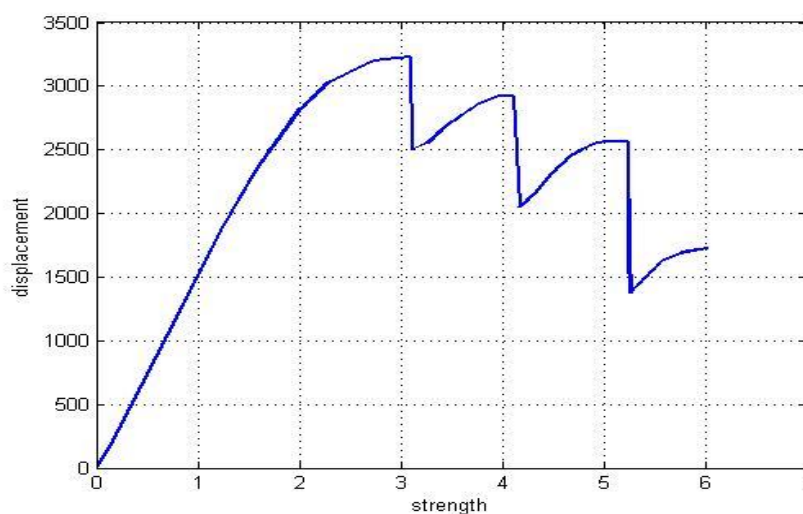


Figure 1. Evolution de la force (N) en fonction du déplacement (mm) du toron

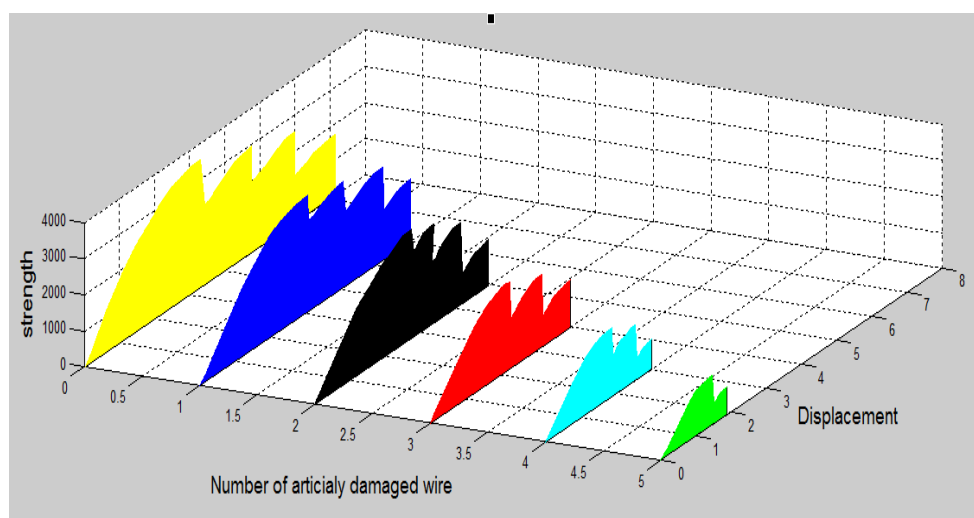
**Table 1 : les propriétés mécaniques de l'âme centrale**

Les propriétés mécaniques	La contrainte maximale	La limite élastique	Module d'Young	Coefficient de poisson
value	1561Mpa	1367Mpa	1896 Gpa	V=0.3

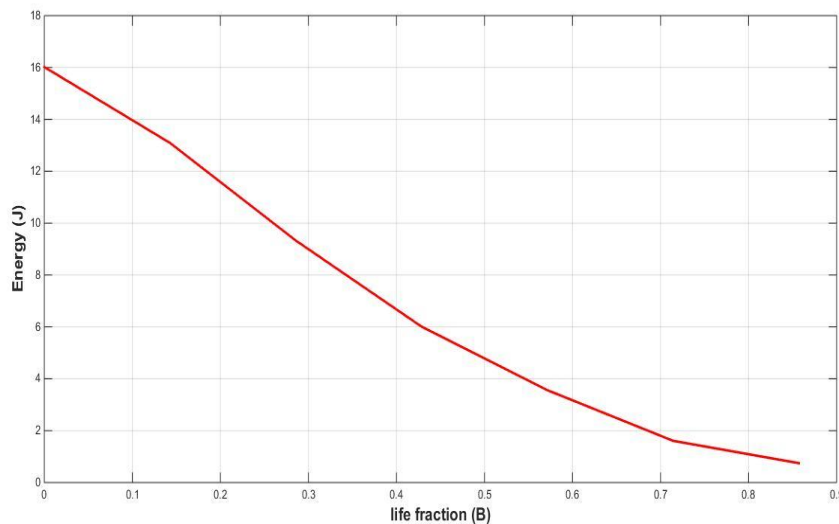
Lors de la réalisation des essais et selon les résultats montrés sur la figure 1, il a été constaté qu'un toron possède une force ultime résiduelle qui chute à chaque rupture d'un fil constitutif puis reprend sa raideur, jusqu'à atteindre la valeur de rupture finale de l'éprouvette qui correspond à la rupture du dernier fil. Ceci peut être traduit par une perte de force du toron en fonction du nombre de fils rompus. Et une diminution de l'énergie de l'âme centrale. Cette énergie correspond à l'aire sous la courbe de traction, et calculée par l'intégrale trapézoïdale [12]. Pour une âme centrale vierge, cette énergie est de 16.14 J qui signifie qu'elle possède une énergie de déformation très importante, qui sera influencée par la diminution des nombres de fils.

### 3.2 Résultats expérimentaux des essais de traction des éprouvettes de l'âme centrale à différents pourcentages d'endommagement

Les résultats des essais de l'ensemble des éprouvettes ont permis d'obtenir les courbes de traction en fonction de nombre fils rompus (1, 2, 3, 4 et 5) sont donnés dans la figures (2), et par la suite nous avons calculé l'énergie correspondant à chaque courbe. Notons que l'énergie est représentée par l'aire sous les courbes de traction.

**Figure 2. Evolution of the Energy (Joule) for different levels of damage**

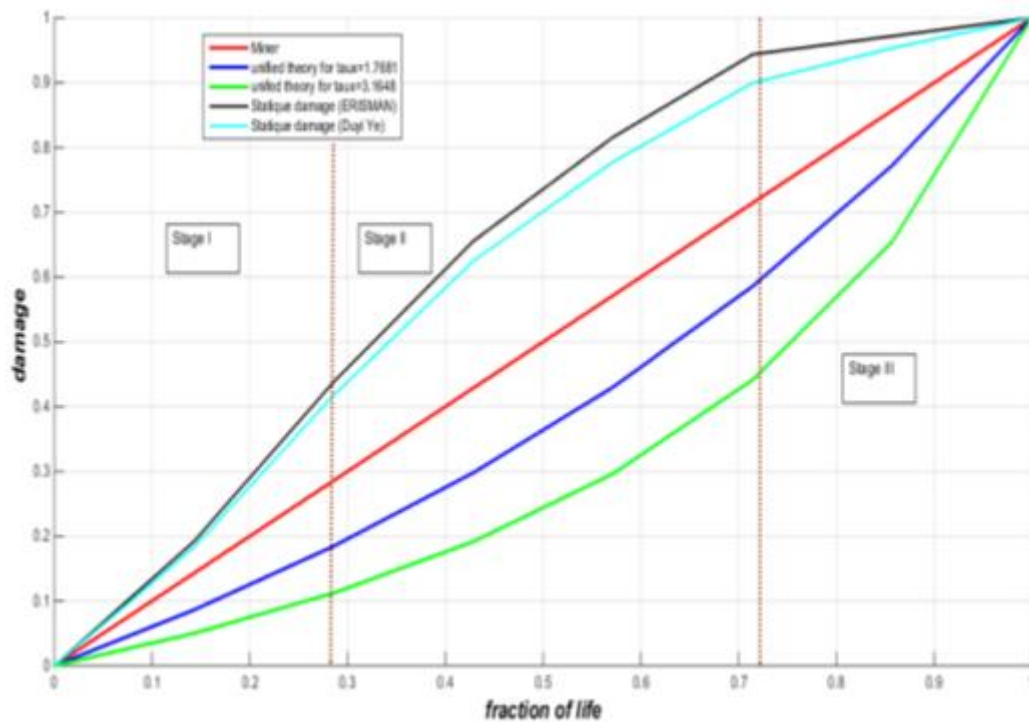
les courbes de figure en 3D d'écrivent l'évolution de l'énergie ultime représentée par l'aire sous chaque courbe pour les différents niveaux d'endommagement (nombre de fils rompus) sachant que l'âme centrale l'état vierge possède la quantité d'énergie ultime maximale qui diminue progressivement avec réduction de nombre de fils.



**Figure 3. Perte d'énergie ultime résiduelle en traction pour torons endommagés à différents pourcentages.**

La perte d'énergie ultime est plus grande pour des fractions de vie plus importantes pour se stabiliser à partir d'environ 5/7 fils rompus à une valeur très basse jusqu'à la rupture. Ce qui peut être traduit par le fait qu'avec la rupture d'un nombre important de fils (70% environ), une faible énergie est capable de rompre l'éprouvette. Suite à cette réaction du toron étudié (âme centrale), il nous a été possible d'évaluer le dommage à chaque niveau d'endommagement et ceci par similitude au comportement d'un matériau soumis à des charges cycliques.

L'évolution du dommage à partir de l'énergie ultime résiduelle pour l'âme préendommagée à différents pourcentages pour tous les modèles utilisés dans cet article et illustrée dans la figure (4).



**Figure 4. Evolution de dommage en fonction de la fraction de vie (tous les modules)**

Les deux modèles du dommage statique montrent clairement la fraction de vie critique autour de 0.78 ce qui équivaut à 5 fils rompus. Les courbes des dommages peuvent être divisées en trois stade : Le premier stade est l'initiation de la rupture pour une fraction de vie comprise entre 0 et 0.28 équivalent à 2 fils rompus ; ce stade reflète l'initiation du dommage qui croît d'une manière assez lente, l'écart entre les deux courbes du dommage statique obtenu à partir de l'approche basée sur ERISMAN et le dommage basé sur l'approche de ( YE, Duyi ) est faible et leur évolution s'accorde .

Le deuxième stade est la propagation qui se situe dans l'intervalle  $\beta = \left[ \frac{2}{7}, \frac{5}{7} \right]$  ; on remarque que le dommage statique par la méthode ERISMAN est supérieur à celui du modèle de ( YE, Duyi ) mais cette différence reste raisonnable à cause des incertitudes liées au calcul de dommage énergétique selon chaque formule mathématique ; aussi les deux courbes se croisent d'une façon identique pendant tout l'intervalle de ce stade .

A ce stade, le dommage devient non sécuritaire et une maintenance prédictive est obligatoire. Le troisième et dernier stade est l'accélération du dommage dont la fraction de vie est supérieure à 70%. Les écarts entre les deux courbes du dommage statique peuvent s'expliquer par la nature des paramètres pris en compte. Dans ce stade, le dommage s'accélère de façon très accentuée et une rupture peut être brutale ; ce qui veut dire qu'à partir de 5/7 fils rompus, l'âme centre est inutilisable et une maintenance prédictive s'impose à l'industriel .

Enfin, nous pouvons dire que les trois modèles d'endommagement représentent trois façons suffisantes et différentes d'évaluer les dommages des torons du câble.

#### 4. Conclusion

Au niveau de l'âme centrale extraite d'un câble métallique de levage et suite aux différents endommagements artificiels provoqués (14%, 28%, 42%, 57% et 71% 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. Trois modèles pour la quantification de dommage ont été utilisées pour cette étude à savoir les méthodes de calculs du dommage statique et la méthode de calcul par théorie unifiée. Les comparaisons des résultats se sont montrées dans l'ensemble relativement conformes. Trois stades de dommage ont été déterminés ; le stade I [0, 28%] correspondant à l'initiation du dommage, le stade II [28%, 71%] correspondant au dommage progressif qui nécessite une maintenance prédictive et le stade III [71%, 1] où le dommage est brutal donc le toron (âme centrale) est déclaré défaillant. Par ailleurs, une étude du comportement d'un câble métallique entier est en cours d'établissement avec pour seules données la géométrie du câble et le dommage du toron hélicoïdal et l'âme centrale.

#### 5. Références

- [1] Wang, D., Zhang, D., Wang, S., & Ge, S. (2013). Finite element analysis of hoisting rope and fretting wear evolution and fatigue life estimation of steel wires. *Engineering Failure Analysis*, 27, 173-193..
- [2] Peterka, P., Krešák, J., Kropuch, S., Fedorko, G., Molnar, V., & Vojtko, M. (2014). Failure analysis of hoisting steel wire rope. *Engineering Failure Analysis*, 45, 96-105.
- [3] Wang, D., Li, X., Wang, X., Shi, G., & Mao, X. (2016). Effects of hoisting parameters on dynamic contact characteristics between the rope and friction lining in a deep coal mine. *Tribology International*, 96, 31-42
- [4] Judge, R., Yang, Z., Jones, S. W., Beattie, G., & Horsfall, I. (2017). Spiral strand cables subjected to high velocity fragment impact. *International Journal of Impact Engineering*, 107, 58-79.
- [5] Shanley, F. R. (1952). *A theory of fatigue based on unbonding during reversed slip* (No. RAND-P-350). RAND CORP SANTA MONICA CA.
- [6] Henry, D. L. (1953). *A theory of fatigue damage accumulation in steel* (Doctoral dissertation, Ohio State University).
- [7] Gatts, R. R. (1961). Application of a cumulative damage concept to fatigue. *Trans. ASME*, 83, 529.
- [8] Bathias, C. (Ed.). (2013). *Fatigue of materials and structures*. John Wiley & Sons.
- [9] Majid, F., Elghorba, M. (2017). HDPE pipes failure analysis and damage modeling. *Engineering Failure Analysis*, 71, 157-165.
- [10] Ghammouri, M., Abbadi, M., Mendez, J., Belouettar, S., & Zenasni, M. (2011). An approach in plastic strain-controlled cumulative fatigue damage. *International Journal of Fatigue*, 33(2), 265-272.

[11] Ye, D., & Wang, Z. (2001). An approach to investigate pre-nucleation fatigue damage of cyclically loaded metals using Vickers microhardness tests. *International journal of fatigue*, 23(1), 85-9