

DEVELOPPEMENT ANALYTIQUE DE L'EVOLUTION DE L'ENERGIE INTERNE, D'UN TORON FORMANT UN CABLE D'ACIER ANTI-GIRATOIRE 19 x 7

Jilali NATTAJ¹

Mohamed SAFE²

Mohamed BARAKAT³

Mohamed EL GHORBA⁴

¹Faculté des sciences et techniques Mohammedia (FSTM), Université Hassan 2, Maroc.

²École Nationale d'électricité et de mécanique, laboratoire de contrôle et de caractérisation mécaniques des matériaux et des structures, Maroc,

j.nattaj@gmail.com

Résumé :

Le premier objectif de ce travail c'est de développer une méthode analytique basée sur des résultats expérimentaux pour évaluer la fiabilité instantanée d'un câble anti-giratoire 19 x7 lors de son contrôle périodique au cours de son exploitation, soumis à deux modes de dégradation (fatigue et usure), en faisant abstraction des autres modes de dégradation, (corrosion, torsion, érosion, etc.) Le matériau utilisé pour l'étude est un câble en acier anti-gyro 19 x 7. C'est une étude expérimentale multi-échelle puisque les câbles sont caractérisés par une structure hiérarchique qui commence par le fil qui constitue le toron qui à son tour constitue le câble. Pour ce faire, plusieurs tests ont été développés sur ses composants [1], le toron à 7 fils qui représente la deuxième échelle a d'abord été caractérisé à l'état vierge et a ensuite subi des dommages artificiels à 4 niveaux en coupant un certain nombre de fils (2, 3, 4 et 5 fils coupés) puis soumis, à chaque situation, à une charge statique, dans le but de suivre les dommages subits par le toron étudié. Le présent rapport est la première partie de ce travail. Il aborde le comportement énergétique d'un toron soumis à des tests statiques, en développant des relations analytiques; basé sur les données des résultats expérimentaux. reliant la variation d'énergie interne du toron pendant l'essai statique, à la fraction de vie caractérisée par le nombre de fils coupés. Ainsi que la déformation plastique du toron que elle aussi sera liée à la variation de l'énergie interne du toron, la contrainte ultime appliquée et le nombre de fils survivants au moment de la fraction de vie considérée. L'intérêt principal de ces deux grandeurs, la variation d'énergie interne et la déformation plastique d'un toron c'est qu'elles peuvent être intégrés dans une maintenance préventive comme critère de contrôle.

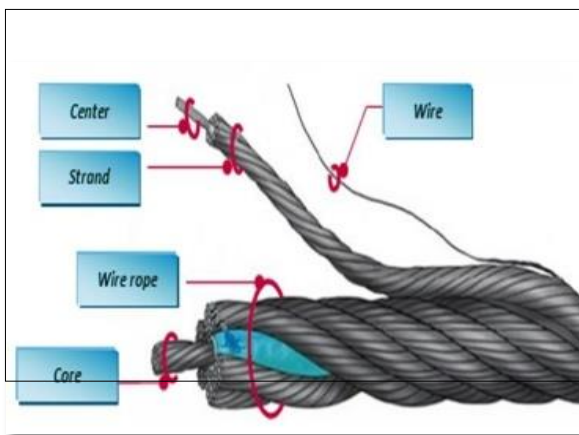
Mots clés : Câble, toron, fil, dommage, fiabilité, énergie interne, fraction de vie.

1. Introduction

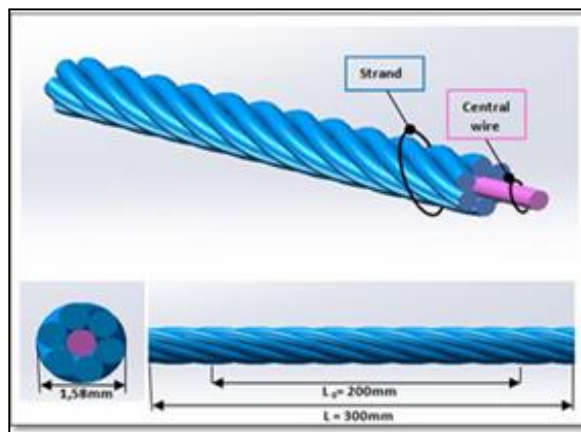
Un câble doit être considéré comme un élément d'usure avec une durée de vie limitée. Un grand nombre de ses propriétés mécaniques changent pendant sa durée d'utilisation. Ainsi, par exemple, sa charge de rupture chute rapidement après avoir atteint un maximum. Cette perte de charge de rupture s'explique par une diminution de la section métallique causée par l'abrasion, par la corrosion, les ruptures des fils et aussi par la déformation du câble. Si dans une chaîne un maillon casse, le moyen de levage est défaillant dans sa totalité. Alors que dans un câble, ses éléments étant parallèles, on peut continuer à l'utiliser malgré de nombreuses ruptures de fils. Le nombre de ruptures de fils augmente constamment. Un des buts de l'examen d'un câble métallique est de surveiller cette évolution pour qu'un câble puisse être déposé en temps utile, avant que son état ne devienne trop dangereux pour le service

2. Matériau étudié

1. Présentation du câble étudié



Différents éléments constitutifs du câble



Éprouvette Toron d'un câble

Figure 1. Différents éléments constituant un câble

2. Préparation éprouvette toron

Les éprouvettes sont prélevées et préparées conformément à la norme ISO 6892 qui traite les essais de traction à température ambiante des matériaux métalliques. Les dimensions des éprouvettes sont présentées sur la figure 1.

3. Spécifications des essais sur les torons

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 [2]. Un ordinateur permet l'acquisition numérique, en cours d'essai, de la force et du déplacement jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

L'ensemble des éprouvettes des torons a été testé en traction monotone selon la norme NF EN 10002-1 à déplacement imposé correspondant à une vitesse de déformation de 2mm/min. Les essais ont été réalisés dans les conditions d'air et de température ambiante (≈ 20 à 24°C) sur une machine de type Zwick Roell avec une cellule d'effort de ± 10 kN.

L'éprouvette d'essai est fixée entre deux mâchoires, la traverse mobile se déplace à une vitesse fixe jusqu'à la fin d'essai (la rupture).

Les essais ont été réalisés sur 5 éprouvettes vierges et 3 éprouvettes pour chaque niveau de dommage artificiel (2,3,4, et 5 fils rompus), ce qui donne un total de 17 éprouvettes.

3. Comportements mécaniques des torons

1. Caractérisation mécanique d'un toron vierge.

L'ensemble des tests menant à la rupture des spécimens de torons prélevés d'un câble métallique de levage 19 x 7 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 2.) et par la suite extraire les caractéristiques mécaniques regroupées dans le tableau.1 (les valeurs données sont des valeurs moyennes).

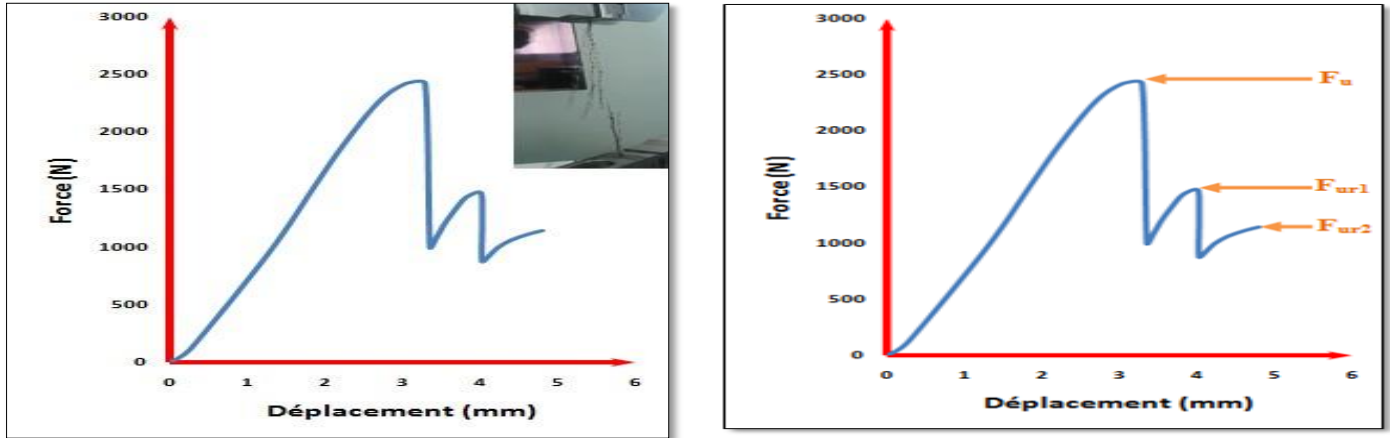


Figure.2 : Les forces ultimes représentées sur la courbe de traction d'un toron vierge

Tableau .1

Module de young	Coefficient de poisson	Limite d'élasticité à 0,2%	Contrainte maximale	Contrainte à rupture
E= 180 Gpa	$\nu = 0,3$	$\sigma_e = 1135 \text{ Mpa}$	$\sigma_u = 1235 \text{ M PA}$	$\sigma_r = 642 \text{ M PA}$

Le résultat de l'essai mécanique représenté à la figure.2, met en évidence la chute de charge provoquée par la rupture d'un certain nombre de fils constitutifs, montrant ainsi lors d'un essai statique, une force ultime résiduelle F_{ur} . En effet, un toron vierge possède une force ultime résiduelle de 2,42 KN puis reprend sa raideur, jusqu'à atteindre la valeur de rupture totale. Les valeurs des contraintes ultimes résiduelles sont reportés au tableau.2 ci-dessous .

Figure.2

Elément	σ_u (MPa)	σ_{ur1} (MPa)	σ_{ur2} (MPa)
Contrainte résiduelle	1237	749	585
Fraction de vie $\beta_i = i/n$	0	3/7	4/7

Où : i = nombre de fils rompus et n = nombre de fils total d'un toron ($n=7$ dans notre cas)-

Après la caractérisation mécanique du toron vierge, une panoplie d'essais a été réalisée visant à étudier la perte de la force statique des éprouvettes antérieurement endommagées artificiellement à différents niveaux.

2. Toron pré-endommagé artificiellement avec 2 fils rompus

En considérant le toron avec 2 fils pré-endommagés artificiellement qui est l'état original du matériau testé, on trouve sur la figure 3, la courbe de traction d'un toron avec 2 fils initialement rompus, accompagnée des valeurs de la perte de force résiduelle portées sur tableau .3.

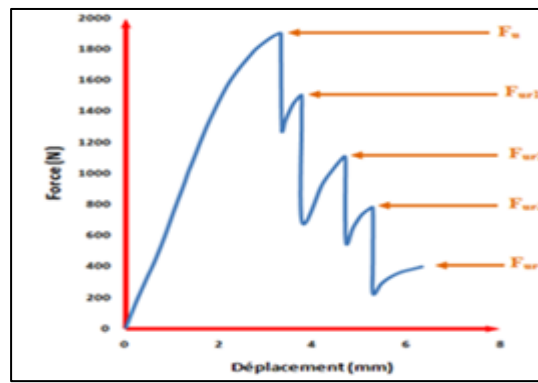


Figure.3 : Les forces ultimes représentées sur la courbe de traction d'un toron avec deux fils rompus

Tableau.4

Elément	σ_u (MPa)	σ_{ur1} (MPa)	σ_{ur2} (MPa)	σ_{ur3} (MPa)
Contrainte résiduelle	964	766	564	399
Fraction de vie $\beta_i = i/n$	3/7	4/7	5/7	6/7

3. Torons pré-endommagés artificiellement à différents niveaux

Sur la figure.4, on trouve la superposition des courbes de traction des torons préendommagés à différents niveaux d'endommagement, accompagnée des valeurs de la perte de force résiduelle portées sur le tableau.5.

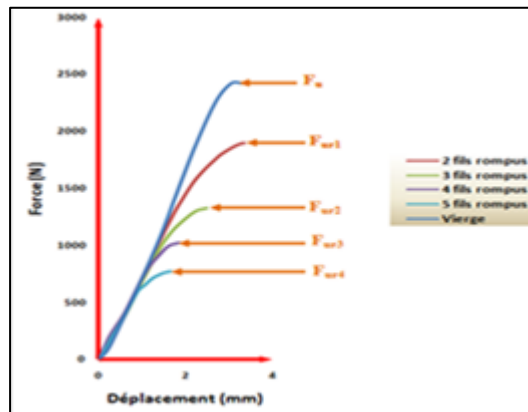


Figure.4 : Les forces ultimes représentées sur la courbe de traction des torons pré-endommagés à différents niveaux

Tableau.5

Elément	σ_u (MPa)	σ_{ur1} (MPa)	σ_{ur2} (MPa)	σ_{ur3} (MPa)	σ_{ur4} (MPa)
Contrainte résiduelle	1237	999	677	522	396
Fraction de vie $\beta_i = i/n$	0	2/7	3/7	4/7	5/7

4. Outils et méthodes pour quantifier l'évolution de la variation d'énergie interne d'un toron soumis à un essai statique.

La représentation graphique de l'évolution du cumule des énergies des torons pré endommagés à différents niveaux (courbe 2), et celle de l'évolution d'énergie du toron soumis à la traction avec deux fils rompus initialement (courbe 1), est donnée dans Figure.5.

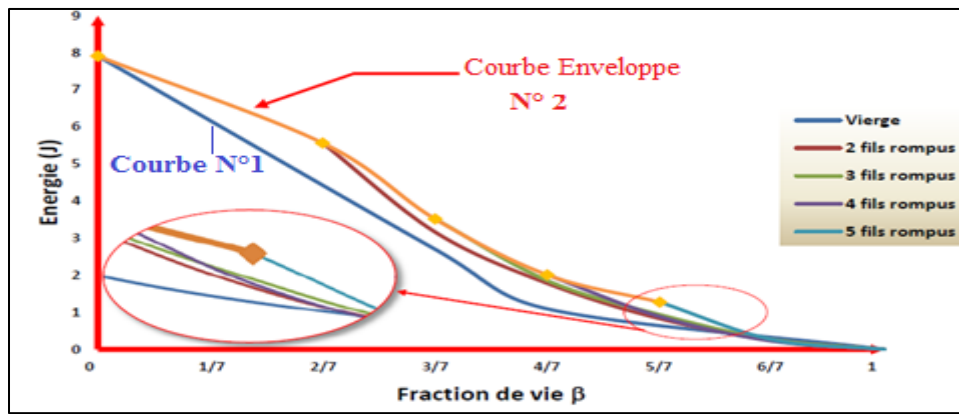


Figure.5.Évolution de l'énergie interne des torons soumis à la traction selon les deux modes d'essais représentés dans les figures 3 et 4

1. Analyse énergétique des résultats

Le graphe de la figure .5, nous montre un différentiel entre la courbe enveloppe énergétique N°2 et celle obtenue par traction continue, courbe N°1, sur un toron vierge. Ce décalage noté ΔU_i , (i représente le nombre de fil rompus) peut être déduite graphiquement pour chaque fraction de vie $\beta_i = \frac{i}{n}$, les résultats sont analysés et révéles que ΔU_i :

- présente un maximum à la fraction de vie $\beta_i = \beta_3 = 43\%$
- Coupe l'axe des fractions de vie en $\beta_{i=0}$ et $\beta_{i=1}$
- La chute de ΔU_i est plus rapide que sa montée
- Pendant les essais de traction des torons pré-endommagés artificiellement à différents niveaux, la mémoire des fils constituant ces torons est nulle au début de chaque essai (courbe N°2). Contrairement à ceux constituant le toron vierge subissant un seul essai statique jusqu'à sa rupture en passant par les différentes fractions de vie β_i (courbe N°1), Alors :
- ΔU_i ne peut être que la **variation de l'énergie interne du toron**, en supposant que les essais sont isentropiques et réversibles.
- D'après toutes ces constations la formulation de ΔU_i peut être représentée comme suit

$$\Delta U_i(\beta_i) = a\beta_i^2 + b\beta_i + c \quad (1)$$

-Les résultats des essais nous permettent de déterminer les constantes a, b et c

$$(1) \Rightarrow \Delta U_i(\beta_i) \approx -4,34\beta_i^2 + 3,71\beta_i - 0,077 \quad (2)$$

.-La Comparaison entre les résultats expérimentaux et l'approche donnée par la corélation (2) est ulistrée dans la figure.6 ci-dessous

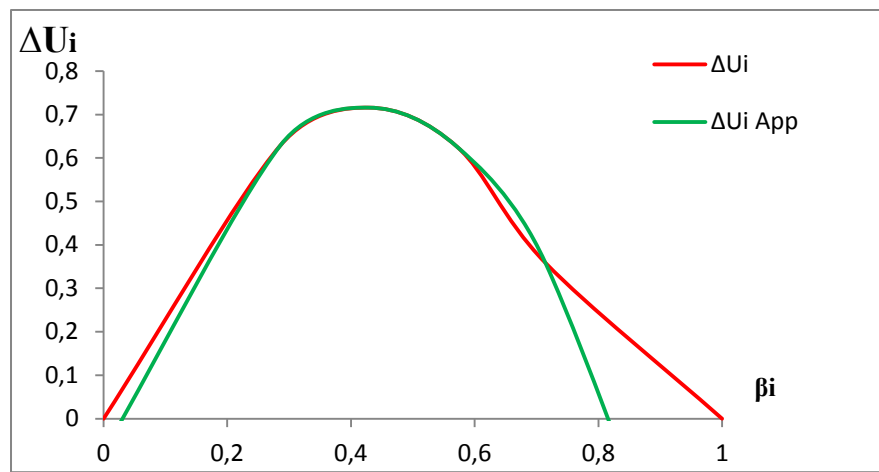


Figure.6 : Courbes, expérimentale ΔU_i et celle approchée par la corrélation (2) ΔU_i App. d'un toron soumis à une charge statique

5. Conclusion :

- L'énergie interne U_i du toron augmente au cours de l'essai statique, elle atteint son maximum vers $\beta_i = 43\%$,
- Sa variation d'énergie interne ΔU_i augmente au cours de l'essai statique, atteint son maximum à $\beta_i = 43\%$, puis chute pour s'annuler vers la fin de l'essai statique (rupture totale) à $\beta_i = 83\%$,.
- L'équation analytique (2) est une bonne approche de la courbe expérimentale de ΔU_i
- La variation d'énergie d'un toron est fonction de sa fraction de vie, elle peut être considérée comme un des critères de décision lors d'un contrôle périodique d'un câble en acier de levage conformément à une politique de maintenance prédictive.

6. Bibliographie.

- [1] Nadia Mouhib et al, Étude multi-échelles du comportement mécanique d'un câble métallique de levage de type anti-giratoire (19 x7) soumis à des chargements statiques et prédiction de sa durée de vie: expérimental, analytique et numérique, ENSEM, Université Hassan 2, Ain Chock, Casablanca 2010.
- [2] Norme ISO 6892 «Matériaux métalliques – Fils – Essai de traction» 1984.