

Nouvelle Approche pour l'Évaluation de la Sûreté de Fonctionnement des Câbles Métalliques de Levage

Houda Mouradi, Abdellah El barkany et Ahmed El biyaali

Laboratoire de Génie Mécanique

Faculté des Sciences et Techniques, Université Sidi Mohamed Ben Abdallah
Fès, Maroc

Emails: houda.mouradi@gmail.com, a_elbarkany2002@yahoo.fr, biyaali@yahoo.fr

Résumé— Les câbles métalliques constituent l'élément principal des appareils de levage et de manutention. Ces activités de levage qu'on trouve dans plusieurs secteurs à savoir le secteur de la construction, le secteur manufacturier, le secteur du commerce de gros, le secteur agricole ainsi que les ascenseurs. La rupture brutale des câbles des appareils de levage peut mettre en péril la santé et la sécurité des personnes et des biens et causer des coûteux arrêts de travail. De ce fait, la sécurité de ces derniers dépend directement de la sûreté de fonctionnement de ces câbles. Ainsi, les entreprises ont intérêt à éliminer ou à contrôler les risques d'accidents liés à l'utilisation des câbles de levage 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 afin de planifier et d'organiser des actions de la maintenance préventive et de pouvoir les changer au temps opportun.

Notre travail consiste à développer un modèle probabiliste décrivant la fiabilité d'un câble métallique de levage au cours d'utilisation en tenant compte de sa dégradation (à divers niveaux d'endommagement de ses composants). Par ailleurs, suite à cette étude, nous proposons une analyse théorique des indicateurs de la sûreté de fonctionnement qui regroupent les activités d'évaluation de la fiabilité, de la maintenabilité et de la disponibilité d'un câble métallique de levage. Ainsi, cette modélisation permettra de faire le suivi des performances du câble en fonctionnement et de détecter d'éventuels phénomènes de vieillissement susceptibles de le dégrader. L'approche adoptée est une approche multi-échelles avec un découplage total entre l'échelle du fil, l'échelle du toron et celle du câble.

Mots clés— Câble métallique de levage ; modélisation ; durée de vie ; sûreté de fonctionnement ; dommage.

I. INTRODUCTION

Les câbles métalliques de levage "Fig. 1" sont généralement constitués d'une âme centrale sur laquelle s'enroulent plusieurs torons en une ou plusieurs couches superposées. Le toron se compose à son tour de plusieurs fils régulièrement disposés autour du fil central ou une ou plusieurs couches.

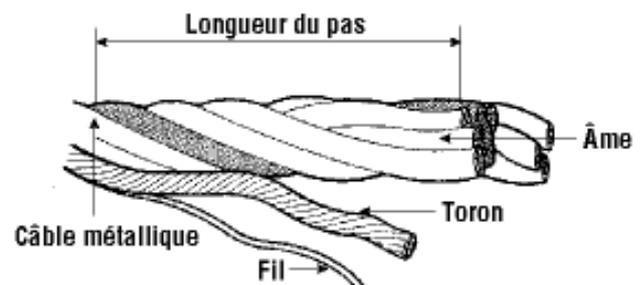


Fig. 1. Schéma illustrant les différents composants d'un câble métallique de levage.

Depuis longtemps l'utilisation des câbles métalliques a connu un essor extraordinaire et a touché de nombreuses applications. Ils sont des éléments structuraux ayant des propriétés mécaniques énormes qui leur permettent de réaliser des tâches difficiles à savoir: le levage des charges, le haubanage des ponts, l'arrimage des bateaux, le transport d'électricité... D'autre part, les câbles métalliques sont soumis à des contraintes dans le temps et par conséquent à des dommages, qui sont les principales causes de la diminution de leur capacité résistante et leur fiabilité [1]. A cet égard, la sécurité des personnes qui les utilisent dépend directement de leurs états. Ainsi, les accidents dus aux défaillances des câbles métalliques de levage présentent la majeure préoccupation des bureaux d'études et spécialement si les coûts sont mesurés en terme de vies humaines. Par conséquent, il est très important de prédire leurs comportements mécaniques avant leurs mises en service. Pour cela, une attention considérable a été consacrée par les chercheurs pour déterminer la durée de vie des câbles métalliques de levage.

En premier temps, plusieurs modèles théoriques et études analytiques ont été développés pour prédire le comportement mécanique des câbles métalliques de levage. La plupart de ces études analytiques ont été basées sur les solutions des équations d'équilibre bien connues et qui n'intègrent pas la complexité de la géométrie de ces câbles. Par la suite, avec le développement de la technologie et de l'informatique,

l'analyse numérique a commencé à être fréquemment utilisée pour prédire le comportement de telles structures. Par conséquent, une approche par éléments finis a été adaptée par plusieurs chercheurs pour étudier le comportement mécanique en tout point de ces câbles. En outre, Certains chercheurs ont développé des modèles analytiques basés sur des approches multi échelles probabilistes pour étudier la fiabilité des câbles métalliques de levage. Mais, malgré ces études, ils ne pouvaient pas se mettre d'accord sur une formule générale permettant le calcul de la fiabilité et de la durée de vie de ces câbles. Cela nous a encouragé à chercher dans la littérature, le modèle probabiliste le plus logique afin de développer une formule globale de la fiabilité applicable sur tous les types de câbles métalliques de levage. Ainsi, notre travail consiste à développer un modèle probabiliste décrivant la fiabilité d'un câble métallique de levage au cours d'utilisation et de le comparer avec ceux existants dans la littérature.

II. REVUE DE LA LITTÉRATURE

La théorie du câble est basée sur des équations d'équilibre introduites dans un traité classique bien connu [2]. La plupart des études analytiques sont basées sur les solutions des équations d'équilibre, mais sans traiter les effets de la friction en raison de la complexité de la théorie. Même la géométrie du câble métallique a une nature complexe et les équations d'équilibre deviennent non linéaires et difficiles à résoudre sans processus de linéarisation dans la plupart du temps. En effet, le câble métallique est un ensemble d'éléments interconnectés ou interdépendants de sorte que l'état du câble dépend des états de ses éléments constitutifs [3]. Ainsi il fait partie des systèmes composés les plus complexes. Ceci signifie que toute approche de modélisation de câbles sera une approche multi-échelles.

Différentes approches ont été proposées par Costello [4], afin de modéliser la section transversale complexe de telle constructions. Ces modèles ont donné une bonne approximation de la réponse mécanique du câble. Toutefois, pour obtenir le comportement en fatigue des fils individuels, il était nécessaire d'établir des modèles qui tiennent explicitement compte de la configuration en double hélice. Ainsi, certaines études théoriques ont été développées par Elata et al. [5] qui ont décrit le comportement mécanique d'un câble à âme métallique indépendante, ils ont donné des équations paramétriques qui fournissent la configuration en double hélice des fils individuels. Ensuite Usabiaga et Pagalday [6] ont fourni une procédure analytique pour la modélisation de manière récursive d'un fils de câble soumis à des charges de traction et de torsion. Giglio et Manes [7] ont fourni plusieurs formulations analytiques pour estimer l'état de fatigue dans les fils internes et externes des câbles métalliques de levage. En outre, il n'était pas possible d'obtenir des résultats en tout point du modèle généré juste en utilisant les solutions analytiques de la théorie du câble.

Par conséquent, Une approche par éléments finis a été adaptée pour résoudre ce problème. Une première approche par éléments finis donnée par Jiang et al. [8] qui ont essayé de

montrer le comportement de frottement des fils internes. Par la suite, ils ont présenté un modèle concis d'éléments finis pour un câble simple monocouche [9] et pour un câble à trois couches en tenant compte des caractéristiques de la symétrie hélicoïdale [10]. Par la suite, une analyse numérique a été établie par Erdönmez et İmrak [11] en utilisant la méthode des éléments finis pour prédire le comportement mécanique d'un toron passant par la gorge d'une poulie. Alors qu'ils ont présenté dans un autre ouvrage [12] une technique pour modéliser les câbles à âme métallique indépendante.

D'autre part, certains chercheurs ont élaboré des modèles analytiques basés sur des approches probabilistes pour prédire la fiabilité des câbles métalliques de levage. Une approche multi-échelle a été adoptée dans ces modèles avec un découplage total entre l'échelle du fil, l'échelle de toron et celle du câble. Kolowrocki [13] a développé une modélisation permettant l'estimation de la durée de vie d'un câble métallique. Dans son modèle, il a considéré le câble comme un système mixte (série- parallèle). Le choix de ce système, est justifié par le fait que la couche extérieure du câble est constituée par des torons ayant des diamètres supérieurs à ceux de la couche intérieure. Par ailleurs, la défaillance de l'un de ces torons entraîne celle du câble (système série). Ces derniers sont montés en parallèle avec la couche intérieure (système parallèle). D'autres approches ont été proposées par Cremona [14], où il a choisi de travailler selon deux objectifs : Le premier consiste à évaluer les effets des facteurs qui influencent sur la performance à long terme du câble. Cela l'a obligé de développer un modèle pour l'estimation de la résistance d'un câble à différents niveaux d'endommagement de ses composants, ensuite de relier la réponse du fil avec celle d'un ensemble de fils considérés collectivement (torons) et enfin à celle d'un ensemble de torons (câble). Le deuxième est de développer un modèle de la durée de vie résiduelle (dans des conditions données d'utilisation), car les caractéristiques physiques et mécaniques évoluent avec le temps, en raison de l'influence de l'environnement et les conditions d'utilisation du câble. Selon l'étude réalisée par El achachi et al. [15] concernant les câbles de levage corrodés, un câble de suspension peut être considéré comme un système constitué d'un ensemble de torons disposés en parallèle. Un toron est lui-même constitué d'un ensemble de tronçons disposés en série. Chaque tronçon est constitué de fils torsadés disposés en parallèle. Il considère le câble comme un système: parallèle (n torons) - série (p tronçons de torons) - parallèle (n' fils). Le choix de ces trois échelles est révélé sachant que premièrement, lorsque les fils sont torsadés et enroulés entre eux, un fil rompu a la capacité de se réancrer sur une longueur donnée, appelée longueur de ré-ancrage (système parallèle). Sa valeur selon Raoof [16] allant de 1 à 2,5 fois le pas de tordage et qui définit la dimension du tronçon du toron. Deuxièmement, le comportement d'un toron est profondément lié au comportement du tronçon le plus faible (système série). Troisièmement, les torons étant disposés en parallèle, la résistance du câble dépend de leurs résistances individuelles et de l'inter répartition de la sollicitation. Ensuite, un modèle analytique a été développé

par Meksem et al. [1] pour analyser le comportement mécanique des câbles de levage en s'appuyant sur des critères de défaillance basés sur le nombre inacceptable de fils rompus soumis à la fatigue. Dans son modèle, il considère le câble 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 est justifié comme suit : Un fils 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). D'autre part, les torons sont disposés en série, la défaillance de l'un de ces torons entraîne celle du câble.

III. MODELISATION DE LA RELATION FIABILITE – ENDOMMAGEMENT

Deux paramètres sont capables de suivre l'évolution de la détérioration des câbles jusqu'à la rupture totale [1] : une variable continue, qui est l'endommagement $D(t)$ et un paramètre de nature statistique, qui est la fiabilité $R(t)$. Il est donc très intéressant d'établir un lien entre la fiabilité et l'endommagement par fatigue. Ce lien qui permet d'associer à chaque stade d'endommagement la fiabilité correspondante.

A. Théorie unifiée de l'endommagement uni axial

La sollicitation d'un matériau en fatigue induit généralement une dégradation de ses propriétés physiques. Plusieurs théories ont été suggérées pour qualifier le dommage au cours du processus de fatigue. Une définition logique du dommage doit se baser sur des propriétés mesurables. La théorie unifiée de l'endommagement en fonction de la fraction de vie β est le model mécanique choisi pour traduire l'endommagement du câble par fatigue, elle est basée sur la réduction de la limite de fatigue et la perte de la résistance [17]. Selon cette théorie et dans le cas où la contrainte moyenne est nulle, l'expression du taux de variation de la limite d'endurance en fonction du nombre de cycles appliqués n , s'écrit :

$$\frac{d\gamma e}{dn} = -\frac{1}{kf} \gamma^\alpha (\gamma - \gamma e)^2 \quad (1)$$

Avec :

$$\gamma = \Delta\sigma/\sigma_0 ;$$

$$\gamma e = \sigma e/\sigma_0 ;$$

$\Delta\sigma$: Amplitude de la sollicitation ;

σ_0 : Limite d'endurance du matériau vierge ;

σe : limite d'endurance instantanée ;

kf, a : Constantes du matériau.

La valeur instantanée de la limite d'endurance est utilisée pour définir le dommage :

$$D = \frac{1-\gamma e}{1-\gamma e^t} \quad (2)$$

En faisant des calculs mathématiques on obtient l'expression de l'endommagement en fonction de la fraction de vie qu'on note (β) et qui a comme expression: $\beta = n/N_f$:

Avec :

n : nombre de cycle instantané

N_f : Nombre de cycle cumulé à la rupture.

$$D = \frac{\beta}{\beta + (1-\beta) \frac{\gamma - (\frac{\gamma}{\gamma e})^\beta}{\gamma - 1}} \quad (3)$$

On pose:

$$\alpha = \frac{\gamma - (\frac{\gamma}{\gamma e})^\beta}{\gamma - 1}$$

L'équation (3) devient :

$$D = \frac{\beta}{\beta + \alpha(1-\beta)} \quad (4)$$

La "Fig. 2" illustre la représentation graphique du dommage en fonction de la fraction de vie (β)

B. Fiabilité en fonction de la fraction de vie

On considère le temps comme une succession d'incrément de période (τ), dont $T = n \cdot \tau$, et $\eta = N_f \cdot \tau$

Avec :

n : nombre de cycle instantané ;

τ : Temps entre deux cycles successifs de chargement ;

η : Etalement de la distribution ;

N_f : Nombre de cycle cumulé à la rupture.

Afin de prédire la durée de vie des câbles, il est nécessaire de choisir le modèle statistique approprié pour décrire les durées de vies des échantillons d'essais. Il existe plusieurs modèles pour la description de la fiabilité. La loi de Weibull [18] est la plus utilisée en mécanique et même pour représenter la durée de vie des câbles. C'est une loi très souple et peut s'ajuster à toute sorte de résultats expérimentaux, elle couvre le cas où le taux de défaillance est variable et permet donc de s'ajuster aux périodes de « jeunesse » et aux différentes formes de vieillissement. Elle est définie par trois paramètres : η (paramètre d'échelle), β (paramètre de forme) et γ (paramètre de position).

En exploitant la discrétisation du temps $T = n \cdot \tau$; $\eta = N_f \cdot \tau$

Avec $\gamma = 0$ et en la remplaçant dans le modèle de Weibull [19], nous obtiendrons comme expression de la fiabilité :

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (5)$$

Nous signalons au facteur de forme β par λ pour ne pas le confondre avec la fraction de vie ($\beta = n/N_f$). Nous obtiendrons:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\lambda} \quad (6)$$

Donc :

$$R(t) = e^{-(\beta)^\lambda} \quad (7)$$

La “Fig. 2” illustre la représentation graphique de la fiabilité en fonction de la fraction de vie (β).

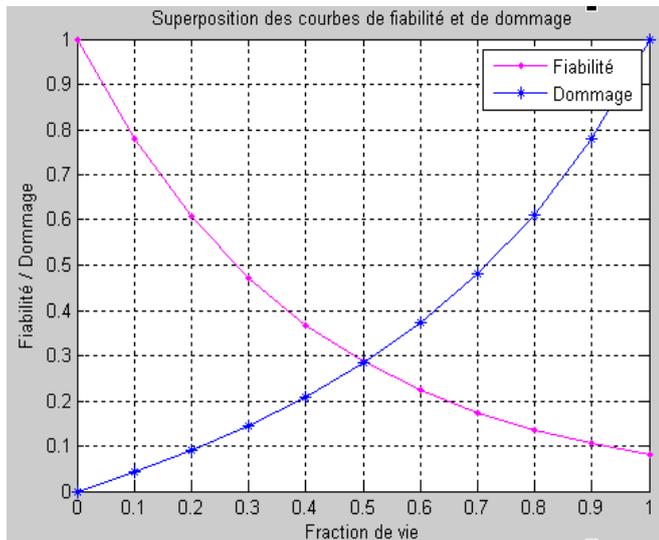


Fig. 2. Superposition des courbes de fiabilité et de dommage.

Cette courbe décrit bien la décroissance de la fiabilité au cours du fonctionnement d’un bien. On remarque aussi que pour une fraction de vie $\beta=1$ la fiabilité est égale à une valeur non nulle. Cette valeur peut être attribuée à une fiabilité résiduelle juste avant la rupture du matériau. Contrairement à la fiabilité on trouve le dommage qui évolue dans le sens opposé avec la fiabilité. Ce qui est bien logique puisque le dommage est la fin de l’aptitude du système à accomplir sa fonction requise.

C. Relation Fiabilité – endommagement

En utilisant “(4)” on peut déduire l’équation de β en fonction du dommage D , qui peut s’écrire comme suit :

$$\beta = \frac{\alpha \cdot D}{1 - D \cdot (1 - \alpha)} \quad (8)$$

Ceci donne l’expression de la fiabilité en fonction du dommage :

$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{\alpha \cdot D}{1 - D \cdot (1 - \alpha)}\right)^\lambda\right) \quad (9)$$

La “Fig. 3” illustre la représentation graphique de la fiabilité en fonction du dommage.

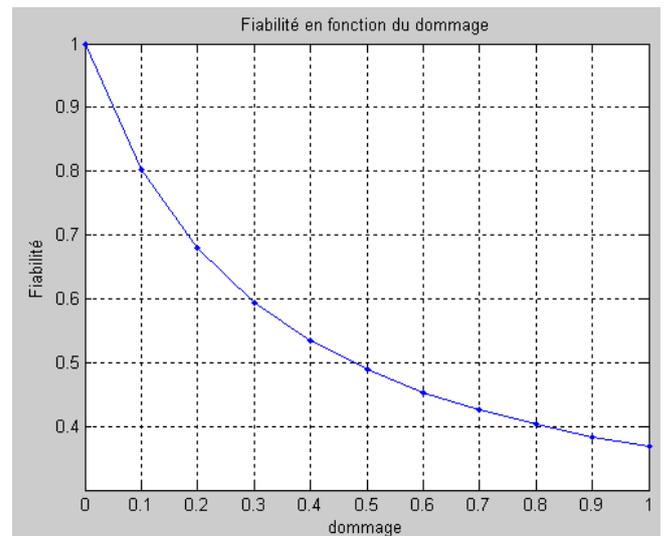


Fig. 3. Représentation graphique de la fiabilité en fonction du dommage

Ce graphe est élaboré pour établir un lien entre la fiabilité et l’endommagement par fatigue. Ce lien qui permet d’associer à chaque stade d’endommagement la fiabilité correspondante. Après une lecture graphique de cette courbe, on remarque que pour un dommage égal à 1, la fiabilité n’est pas nulle. En effet, la théorie du dommage considère que l’endommagement atteint sa valeur maximale 1 lorsqu’il y a apparition d’une fissure macroscopique, mais le matériau garde une certaine résistance traduite par une fiabilité non nulle. Cette dernière le devient lorsque le matériau est totalement rompu.

IV. NOUVELLE APPROCHE DE MODELISATION DES CÂBLES

Un câble métallique de levage peut être considéré comme un système constitué d’un ensemble de torons disposés en un système logique majoritaire, chaque toron est lui-même constitué d’un ensemble de fils torsadés disposés en parallèle. L’approche adoptée est une approche multi-échelle ou on distingue l’échelle du fil, l’échelle du toron et celle du câble.

Le schéma proposé d’un câble métallique suspendu est donc un système : logique majoritaire/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 ;

- ❖ Les fils sont torsadés et enroulés entre eux, un fil rompu a la capacité de se réancrer sur une longueur donnée, appelée longueur de ré-ancrage. Donc on peut les considérer come un système parallèle.

La relation d'un système logique majoritaire /parallèle est donnée par la relation suivante :

$$R(t) = 1 - \left(1 - \sum_{k=m}^n C_n^k R_i^k \cdot (1 - R_i)^{n-k}\right)^p \quad (10)$$

Avec

p : nombre de fils ;

n: nombre total des torons*nombre de tronçons ;

m : le seuil minimal du nombre des torons fonctionnel.

A. Application du modèle proposé sur la relation endommagement – fiabilité

Selon le modèle proposé qui considère le câble métallique de levage comme un système logique majoritaire/parallèle, l'expression de la fiabilité est la suivante :

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

D'après "(6)" on obtient :

$$R(t) = 1 - \left(1 - \sum_{k=m}^n C_n^k \left(\epsilon^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\lambda}\right)^k \cdot \left(1 - \left(\epsilon^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\lambda}\right)^{n-k}\right)\right)^p \quad (11)$$

L'équation de la fiabilité en fonction de la fraction de vie des câbles métalliques selon le modèle logique majoritaire parallèle devient:

$$R = 1 - \left(1 - \sum_{k=m}^n C_n^k \left(\exp(-(\beta)^\lambda)\right)^k \cdot \left(1 - \left(\exp(-(\beta)^\lambda)\right)^{n-k}\right)\right)^p \quad (12)$$

En remplaçant β par "(8)" dans "(12)", on trouve l'expression de la fiabilité en fonction du dommage des câbles métalliques de levage selon le modèle logique majoritaire/parallèle proposé.

$$R(t) = 1 - \left(1 - \sum_{k=m}^n C_n^k \left(\exp\left(-\left(\frac{\alpha \cdot D}{1-D(1-\alpha)}\right)^\lambda\right)\right)^k \cdot \left(1 - \left(\exp\left(-\left(\frac{\alpha \cdot D}{1-D(1-\alpha)}\right)^\lambda\right)\right)^{n-k}\right)\right)^p \quad (13)$$

B. Etude comparative des modèles de fiabilité

Afin de mettre en évidence le critère de défaillance, on se propose de faire une comparaison du modèle proposé avec ceux existants dans la littérature. Un modèle qui considère le câble métallique de levage comme un système série-parallèle, d'autre qui le considère comme un système parallèle-série-parallèle et un dernier qui le considère comme un système série-logique majoritaire. Un câble métallique "fig. 4" de type 8*19 (8 torons 19 fils avec âme en textile) utilisé pour la montée et la descente des ascenseurs fera l'objet de cette comparaison. Les "Fig. 5 et 6" présentent la comparaison de notre modèle avec ceux précités pour deux critères de défaillance différents.

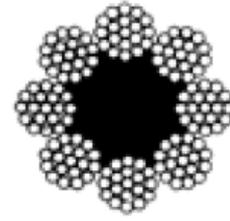


Fig. 4. Câble métallique de type 8*19 (8 torons 19 fils) avec âme en textile utilisé pour la montée et la descente des ascenseurs

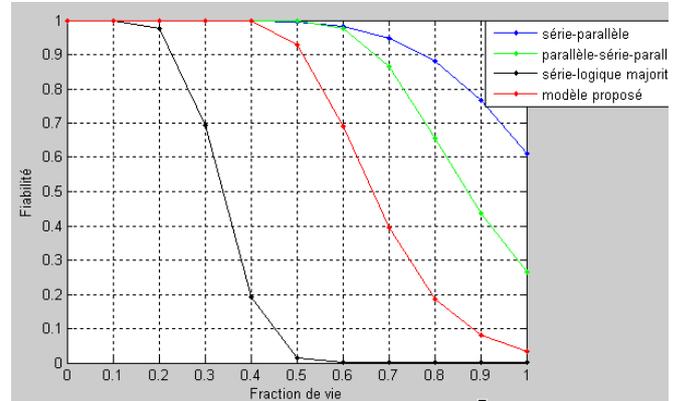


Fig. 5. Comparaison des modèles de fiabilité en prenant comme critère de défaillance 3fils rompus pour le modèle série-logique majoritaire et 3 torons rompus pour le modèle proposé.

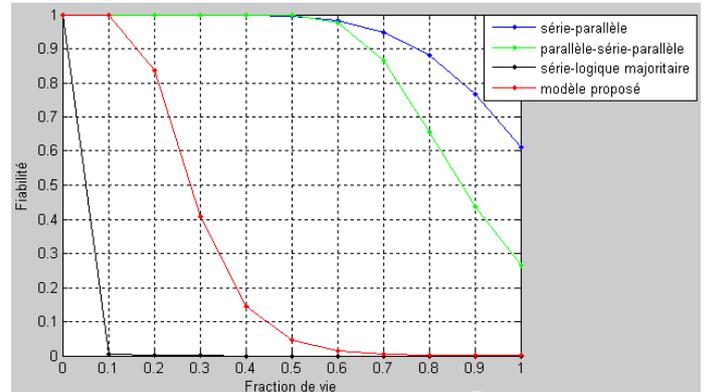


Fig. 6. Comparaison des modèles de fiabilité en prenant comme critère de défaillance 1fil rompu et 1 toron rompu pour le modèle série-logique majoritaire et le modèle proposé respectivement.

D'après Les "Fig. 5 et 6" on remarque que :

- ❖ La fiabilité augmente au fur et à mesure qu'on devient moins exigeant dans le critère de défaillance; Autrement dit, on tolère un nombre important de composants rompus ;
- ❖ On remarque que les courbes des deux premiers modèles probabilistes (série- parallèle et parallèle-série-parallèle) ne changent pas de position en changeant le critère de défaillance donc dans ils ne le prennent pas en considération ;
- ❖ Le modèle série-logique majoritaire change de position en changeant le critère de défaillance donc il le prend en considération. Par contre il ne fait pas objet d'optimisation

des ressources. En effet, la courbe représentative de ce modèle décroît rapidement par rapport aux autres courbes. Le critère de défaillance selon ce modèle est plus sévère que les autres ;

- ❖ Le modèle proposé apparaît bien adapté à la situation réelle d'utilisation des câbles. En effet il prend en considération la dégradation de ces composants en fonctionnement. Il 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 des torons).

V. RELATION FIABILITE- MAINTENABILITE – DISPONIBILITE

A. Indicateur de la fiabilité

La fiabilité est la capacité d'un produit à accomplir une fonction requise dans les conditions indiquées pour une durée déterminé.

Le temps moyen entre deux défaillances, souvent désigné par son acronyme MTBF est la valeur principale utilisée industriellement qui indique la fiabilité d'un composant d'un produit ou d'un système. C'est le temps moyen arithmétique entre deux pannes d'un système réparable.

MTBF = somme des temps de bon fonctionnement / nombre de défaillances.

Mathématiquement, nous exprimons la MTBF par la relation suivante (la relation qui lit la MTBF avec la fiabilité) :

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (14)$$

En remplaçant R(t) par sa relation en fonction de la fraction de vie, qui est:

$$R(t) = \exp(-\beta)^{\lambda}$$

Avec $\beta = t/\eta$

On obtient :

$$MTBF = \int_0^{\infty} \eta \cdot \exp(-\beta)^{\lambda} d\beta \quad (15)$$

L'expression de la MTBF en fonction de la fraction de vie selon le modèle proposé précédemment devient :

$$MTBF = \int_0^{\infty} \left[1 - \left(1 - \sum_{k=m}^n C_n^k (\exp(-\beta)^{\lambda})^k \cdot (1 - (\exp(-\beta)^{\lambda}))^{n-k} \right)^p \right] \eta d\beta \quad (16)$$

B. Indicateur de la maintenabilité

La maintenabilité est la capacité d'un produit à être maintenu ou rétabli ou reprend l'exercice de sa fonction après sa défaillance.

La maintenabilité est exprimée en utilisant l'indicateur MTTR (temps moyen de réparation); il exprime le temps moyen pour réparer les taches.

MTTR = temps d'arrêt total / nombre de pannes.

En général, la relation qui lit MTBF et MTTR est donnée par l'équation suivante :

$$MTTR = (MTBF)^{-1} \quad (17)$$

En combinant "(16)" et "(17)", on retrouve l'équation finale de la MTTR :

$$MTTR = \left(\int_0^{\infty} \left[1 - \left(1 - \sum_{k=m}^n C_n^k (\exp(-\beta)^{\lambda})^k \cdot (1 - (\exp(-\beta)^{\lambda}))^{n-k} \right)^p \right] \eta d\beta \right)^{-1} \quad (18)$$

C. Indicateur de la disponibilité

La disponibilité est la capacité d'un équipement ou d'un système, sous les aspects combinés de sa fiabilité, maintenabilité et son organisation de la maintenance, à être en mesure d'accomplir une fonction requise dans des conditions spécifiées. Elle est obtenue en divisant la période pendant laquelle cet équipement ou ce système est opérationnel par le temps total au cours duquel nous aurions aimé qu'il le soit. Ce rapport est habituellement exprimé en pourcentage. "(19)" donne l'expression de la disponibilité en fonction de la MTBF et MTTR.

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (19)$$

Les indicateurs de sureté de fonctionnement ci-dessus seront calculés et analysés dans nos futurs travaux de recherche en s'appuyant sur un cas réel d'utilisation des câbles métalliques de levage et de manutention pris d'un milieu industriel.

VI. CONCLUSION

Ce travail est élaboré pour décrire la fiabilité d'un câble métallique de levage au cours d'utilisation en tenant compte de sa dégradation. Cela nous a permis d'associer à chaque stade d'endommagement de ses composants la fiabilité correspondante. Nous avons vérifié l'adaptabilité du modèle proposé avec plusieurs types de câbles à savoir le câble antigiratoire multicouche de type (17*7), un câble monocouche de type (6*7) avec âme métallique et en textile et dans cet article nous l'avons appliqué sur un câble d'ascenseur de type (8*19). Par ailleurs, ce modèle apparaît bien adapté à la situation réelle d'utilisation des câbles et prend en considération la dégradation de leurs composants en opération. Par la suite, nous avons donné les équations des indicateurs de la sûreté de fonctionnement des câbles associées au modèle proposé qui regroupent la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité. Ces indicateurs seront calculés dans un futur travail de recherche en prenant un cas réel d'utilisation des câbles métalliques de levage.

Références

- [1] A. Meksem, M. El Ghorba, A. Benali, A. El barkany, "Optimization by the reliability of the damage by tiredness of a wire rope of lifting," *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 61, pp. 15-24, June 2011.
- [2] C. Erdem İmrak and Cengiz Erdönmez, "on the problem of wire rope model generation with axial loading," *Mathematical and Computational Applications*, Vol. 15, No. 2, pp. 259-268, 2010.
- [3] J. Song, A. Der Kiureghian, "Bounds on system reliability by linear programming," *J. Engineering Mechanics, ASCE*, 129(6), pp. 627-636, 2003.
- [4] Costello GA. *Theory of wire rope*, 2nd ed., New York: *Springer*, 1997.
- [5] Elata, D., Eshkenazy, R. and Weiss, M.P. "The mechanical behavior of a wire rope with an independent wire rope core," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 41 No 5-6, pp.1157-1172, 2004
- [6] H. Usabiaga and J. M. Pagalday, "Analytical procedure for modelling recursively and wire by wire stranded ropes subjected to traction and torsion loads," *International Journal of Solids and Structures*, doi:10.1016/j.ijsolstr.2008.04.009, 2008.
- [7] Giglio M, and Manes A. "Life prediction of a wire rope subjected to axial and bending loads," *Eng Fail Anal* 2005;12:549–68.
- [8] Jiang, W. G. and Henshall, J. L. "The analysis of termination effects in wire strand using finite element method," *Journal of Strain Analysis*, Vol. 34 No. 1, pp.31-38, 1999.
- [9] Jiang, W. G., Yao, M. S., and Walton, J. M. "A concise finite element model for simple straight wire rope strand," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 41 No. 2, pp.143-161, 1999.
- [10] Jiang, W. G., Yao, M. S., and Walton, J. M "A concise finite element model for three-layered straight wire rope strand," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 42 No. 1, pp.63-86, 2000.
- [11] Erdönmez, C. and İmrak, C.E. "Modeling and numerical analysis of the wire strand," *Journal of Naval Science and Engineering*, Vol. 5 No. 1, pp. 30-38, 2009.
- [12] İmrak, C.E. and Erdönmez, C. "On the problem of wire rope model generation with axial loading," *Mathematical and Computational Applications*, Vol. 15 No. 2, pp. 259-268, 2010,
- [13] K. Kolowrocki, "Asymptotic approach to reliability evaluation of rope transportation system," *Morska*, N° 83, pp.81-962, Gdynia, Poland, 2000.
- [14] Cremona C. "Probabilistic approach for cable residual strength assessment," *Eng Struct* 2003;25(3):377–84.
- [15] S.M. Elachachi, D. Breyse, S. Yotte, C. Crémona. "A probabilistic multi scale time dependent model for corroded structural suspension cables," *Probabilistic Engineering Mechanics*, vol.21, n°3, pp.235-245, 2006.
- [16] Raoof M, Kraincanic I. "Determination of wire recovery length in steel cables and its practical applications," *Comput Struct* 1998;68:445–59.
- [17] A. MEKSEM, M. EL GHORBA, A. BENALI and M. CHERGUI, "Analytical Modeling of the relationship of reliability damaging by fatigue," *Review of composites and advanced materials, France*. Vol 20, N°1, pp103-113, 2010.
- [18] K. Kolowrocki (2004), "Reliability of Large Systems," Elsevier, Amsterdam.
- [19] E. CASTILLO, A. FERNANDEZ-CANTELI, J.R. TOLOSA and J.M SARABIA, "Stastical Models for Analysis of Fatigue Life of Long Elements," *J. Engineering Mechanics, ASCE*, Vol 116, N° 5, pp. 1036-1049, 1990.