

Investigation sur le rôle des différentes échelles d'une tresse lors d'un pré-étirage ainsi qu'une étude expérimentale sur l'influence du type de pré-étirage sur le comportement de la tresse

Cédric BAIN^[1, 2, 3], Peter DAVIES^[2], Yann MARCO^[1], Guilhem BLES^[1],
Julien BARNET^[3]

1. Institut de Recherche Dupuy de Lôme IRDL-UMR CNRS 6027, ENSTA Bretagne, Brest
2. IFREMER- Laboratoire Comportement des Structures en Mer, Brest
3. INOROPE, Concarneau

Résumé :

Les fibres synthétiques sont des matériaux de plus en plus utilisés dans le milieu industriel grâce aux nombreux avantages qu'ils apportent tels que leur excellent ratio résistances mécaniques/poids, mais également leur tenue à l'environnement extérieure notamment le milieu marin. L'étude présentée ici dévoile les résultats expérimentaux permettant de comprendre les mécanismes intervenant dans la réponse mécanique d'une tresse à une sollicitation en traction. L'influence de l'historique de chargement est également étudiée à travers la variation des protocoles de pré-étirage avant un essai simple de caractérisation. Des premières conclusions ont pu être extraites, cependant des observations et résultats viendront enrichir cette base de données.

Abstract:

Synthetic fiber ropes are widely used in sailing and in the offshore industry thanks to their numerous qualities: light weight, good mechanical properties and excellent marine resistance, compared to steel cables. In the present work, the influence of the bedding-in level and loading cycles has been studied in order to develop an optimal bedding-procedure both for braided ropes and stranded ropes.

Different bedding-in sequences have been performed at the different rope component scales. The influence of the maximum bedding-in load level and the loading path were studied. The load levels were: 10%, 30% and 50% of the minimum break load of the sample. From the results obtained, the influences of construction and material have been evaluated and an optimum bedding-in process is being defined.

Mots clefs : Tresse, fibres, synthétiques, pré-étirage, histoire, chargement, échelles, Dyneema, HMPE, cordage

1. INTRODUCTION

Les cordages, de fait de leurs avantages que sont principalement leur résistance à l'environnement et leur légèreté, sont utilisés depuis plus de mille ans. Les fibres synthétiques que sont le polyamide, le polyester, l'aramide, le polyéthylène, etc. sont récents dans l'histoire des cordages. Le toron est un type de cordage réalisé en torsadant plusieurs fuseaux, et a été largement étudié (Raouf and Hobbs, 1988), (Del Vecchio, 1992), (Ghoreishi, 2005). Les tresses quant à elles, sont l'autre principal type de construction, et sont étudiées depuis plusieurs décennies (Vu et al., 2015). Certains chercheurs se sont focalisés sur l'influence de la construction du cordage sur le comportement mécanique (Raouf and Hobbs, 1988), (Hoppe, 1991) et (Leech and Hearle, 1993). D'autres se sont plus orientés sur l'histoire du chargement (Lian et al., 2018a). Afin de bien comprendre le comportement mécanique des tresses synthétiques, le rôle de la construction et l'histoire du chargement nécessite des études approfondies.

L'objectif majeur de ces études est de pouvoir modéliser numériquement ou empiriquement le comportement mécanique par compréhension de la géométrie du cordage, des interactions entre chaque échelle du cordage et du comportement des sous-échelles. Par exemple, différents modèles de comportement pour cordages toronnés ont, dans un premier temps, été développés tels que ceux de (Raouf and Hobbs, 1988), (Hoppe, 1991) et (Leech and Hearle, 1993), des évolutions ont été proposées par la suite par (Davies et al. 2006), (Ghoreishi et al., 2007). Les tresses ont été moins étudiées que les cordages toronnés pendant quelques chercheurs ont étudié leur comportement et proposé des modèles, en particulier (Vu et al., 2015) et (Rawal et al., 2015).

Le procédé de pré-étirage et d'histoire de chargement a été étudié dans les détails dans le cadre du développement de l'utilisation des cordages polyester pour lignes de mouillage dans l'industrie off-shore. Beaucoup d'études ont montré le fait qu'un pré-étirage changeait de manière significative les propriétés mécaniques des cordages notamment (Banfield and Casey, 1998), (Del Vecchio, 1992), (Del Vecchio, 1992), (Davies et al., 2002), (Hooker and Bosman, 1999), (Casey et al., 2000), (Liu et al., 2014), et (Weller et al., 2014), (Casey et al., 2000), (Davies et al., 2002). Par la compréhension des effets du pré-étirage, des modèles de comportement simplifiés ont vu le jour, (Davies et al., 2002), (Liu et al., 2014). (Lian et al., 2018a) ont observé que différents niveaux de pré-étirage peut induire différents niveaux de déformation, de fluage et de raideur dynamique pour le même type de cordage. Pour cette raison l'investigation du comportement des cordages lors du pré-étirage est essentielle pour de nombreuses applications. Même si tout le monde s'accorde au fait qu'un pré-étirage est nécessaire pour stabiliser les propriétés des cordages, il existe différentes recommandations: (American Bureau of Shipping (ABS), 2011), (Bureau Veritas, 2007) et (International Standards Organization (ISO), 2004). D'autres protocoles ont été utilisés dans diverses recherches (Del Vecchio, 1992), (Casey and Banfield, 2005), (Lechat, 2007), (Humeau, 2017). Ces différentes études nous montrent la variété des pré-étirages employés et qu'il n'y a pas un unique procédé. C'est pourquoi (Lian et al., 2018a) ont présenté une méthode quantitative afin de déterminer le niveau de pré-étirage sur des cordages synthétiques basé sur les courbes tension/déformation.

La majorité des études réalisées sur le pré-étirage se sont portées sur les fibres polyester, polyamide et aramide. Très peu de chercheurs, à l'exception de (Lian et al., 2018b), se sont intéressés au HMPE. Selon les connaissances des auteurs, aucune étude à ce jour ne s'est intéressée au comportement du HMPE DyneemaTM SK99.

Pour finir, cet état de l'art nous montre que le pré-étirage est primordial pour les cordages synthétiques. Une bonne compréhension des mécanismes impliqués est très importante pour de multiples applications marines. Le but de cette étude est de présenter les résultats permettant de décorréliser les contributions de la construction et du matériau lors du procédé de pré-étirage sur le comportement mécanique des tresses en HMPE. Différents types de pré-étirage ont été appliqués pour investiguer l'influence de l'histoire de chargement sur le comportement mécanique.

2. MATERIAU ET METHODES

2.1 MATERIAU

Le matériau de notre étude est constitué de fibres DyneemaTM de grade SK99 fourni par DSM. Le cordage est une tresse de diamètre 4mm faite de 16 fuseaux. Le Dyneema SK99 est un grade spécialement conçu pour le nautisme, et très peu étudié dans le milieu de la recherche. Les tresses sont fournies par la corderie Lancelin (Ernée, France).

Dans le but de quantifier le rôle de la construction au cours d'un pré-étirage, le pré-étirage s'est effectué à chaque échelle de la tresse, cf Figure 1.

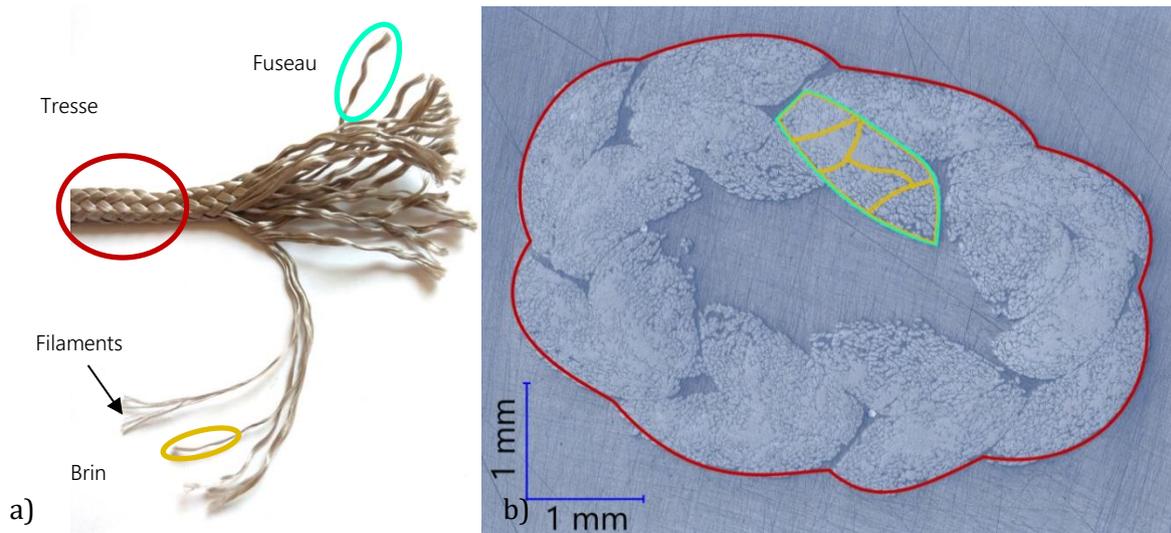


Figure 1. Section de tresse avant pré-étirage montrant les différentes échelles de la tresse

Les différentes échelles de tresse sont : la tresse, le fuseau, le brin et le filament (en anglais : rope, strand, yarn, filament). La tresse est constituée de 16 fuseaux, chaque fuseau de 5 brins et chaque brin d'approximativement 800 filaments.

2.2 EPROUVETTES ET MOYENS EXPERIMENTAUX

2.2.1 Tresse

La machine d'essai utilisé pour l'échelle de la tresse est une ADAMELTM Lhomargy DY 36 avec un capteur d'effort de 100kN

Les échantillons testés sont des tresses avec des épissures à chaque extrémité, Figure 2. Différents chercheurs (Leech and Hearle, 1993), (Leech, 2003), (Milne and McLaren, 2006) ont étudié le meilleur moyen d'accrocher des cordages, et l'épissure procure une charge à rupture optimale. Ces échantillons sont mis en charge sur des goupilles de diamètre 20mm

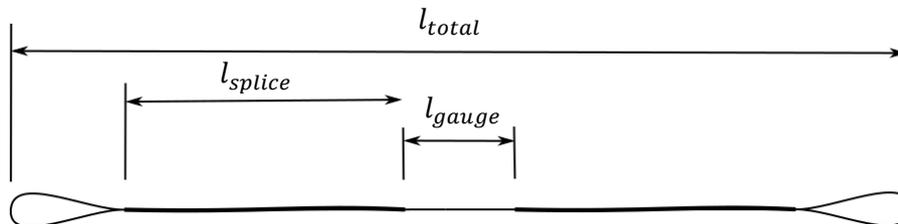


Figure 3. Géométrie d'une éprouvette tresse

Un moyen de mesure de déformation locale a été utilisé afin de ne pas prendre en compte le glissement pouvant intervenir au niveau des épissures. La géométrie des éprouvettes est la suivante : 10-20cm de longueur utile, 30-35 cm de longueur d'éprouvette pour une longueur totale de 160-180cm.

La charge à rupture de la tresse (Minimum Breaking Load = MBL) a été déterminée à l'aide de 8 essais : une valeur de 14.7 kN a été trouvée avec un écart type de 0,79 kN. La masse linéique de la tresse a été mesurée à 8.685g/m.

2.2.2 Brin

La machine d'essai utilisée pour l'échelle de la tresse est une INSTRONTM modèle 5566 avec un capteur d'effort de 500N

Le montage d'essai est similaire à celui de la tresse, la déformation est déterminée avec un suivi de marqueurs par caméras. Des mors spécifiques pour brins ont été utilisés. Les brins ont été extraits des tresses fournies. L'ensimage (revêtement) appliqué sur les fibres permet une séparation facile des fuseaux en 5 brins.

De la même manière que pour les tresses, la charge à rupture des brins a été mesurée à 280N (3 mesure avec un écart type de 15.7N). La masse linéique des brins est quant à elle de $973 \cdot 10^{-4}$ g/m

2.2.3 Filament

La machine d'essai utilisée pour l'échelle de la tresse est une INSTRONTM modèle 5566 avec un capteur d'effort de 50N

Les filaments sont extraits des brins, et chaque extrémité est collée entre 2 pièces de carton avant de les mettre en place dans des mors pneumatiques.

Afin de déterminer la masse linéique des filaments, la section de brin a été observée au microscope KEYENCETM afin de compter le nombre de filaments présents. Ainsi il a été possible de déterminer la masse linéique d'un filament :

$$\rho_{\text{filament}} = \frac{\rho_{\text{brin}}}{\text{nombre de filament dans un brin}}$$

La difficulté d'extraction et le faible diamètre du filament (20 μ m) font qu'il est très difficile d'effectuer un suivi de marqueurs. Plusieurs essais avec suivi de marqueurs ont tout de même pu être réalisés et ainsi valider l'absence de glissement au sein de mors. De ce fait la déformation du filament a été déterminée à partir du déplacement de la traverse de la machine d'essais.

Comme précédemment, la charge à rupture des filaments a été déterminée à 0.402N (12 essais avec un écart type de 0.059N), tandis que la masse linéique est de $1.24 \cdot 10^{-4}$ g/m.

2.3 DEFINITIONS ET PROTOCOLES

2.3.1 Paramètres

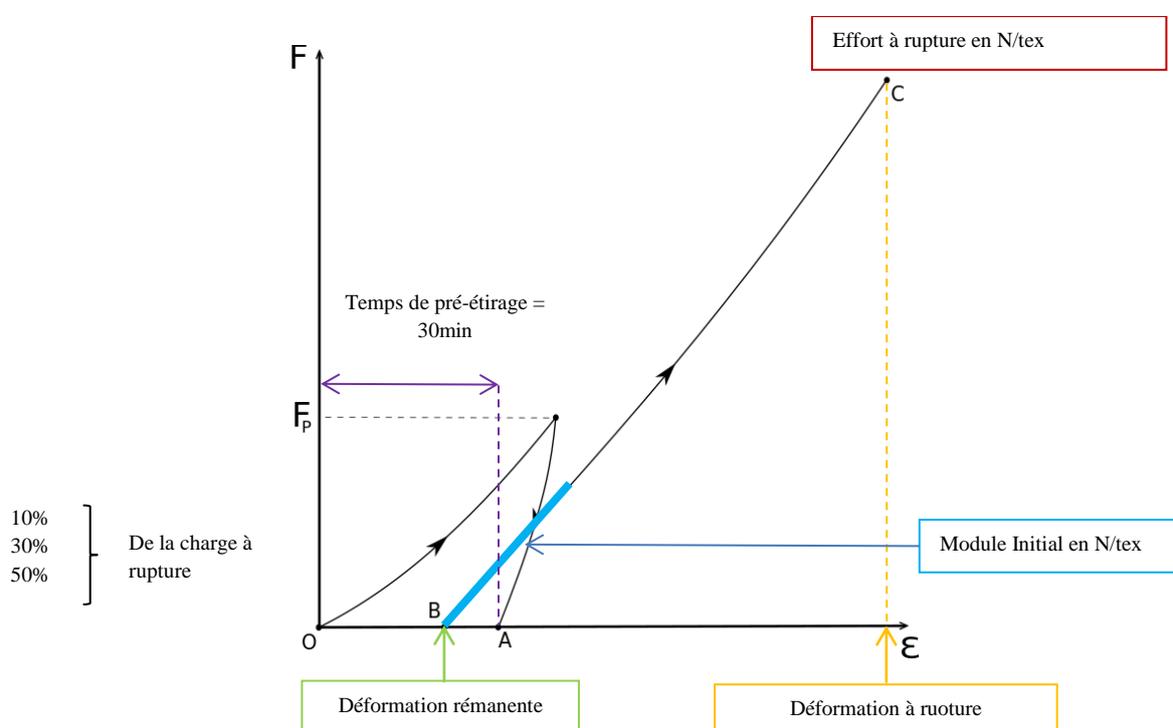


Figure 5. Données extraites pour un essai avec un protocole de pré-étirage Charge/Décharge

2.3.2 Contraintes et déformations

Comme dit précédemment, les cordages en fibres synthétiques proposent une structure complexe. La contrainte de Cauchy basée sur la section de l'éprouvette devient compliquée à appliquer ici (voir Figure 1). La contrainte massique spécifique (Specific Stress) $\tilde{\Sigma}$ (Fer, 1971) est basé sur la masse linéique de l'échantillon testé :

$$\tilde{\Sigma} = \frac{1}{\rho_t} \tilde{T}$$

Avec:

- ρ_t : densité en g/m^3
- \tilde{T} : tenseur des contraintes de Cauchy Pa

Cas 1D (celui des fibres) :

$$\Sigma = \frac{F}{\bar{\rho}}$$

Avec:

- $\bar{\rho}$: masse linéique en g/m
- F : Tension en N

L'unité de mesure pour cette étude est le N/tex:

$$1 \frac{J}{g} = 10^{-3} \frac{N}{tex} = 1 \frac{Pa}{\left(\frac{g}{m^3}\right)}$$

Cette contrainte massique spécifique permettra ainsi de comparer le comportement des différentes échelles de la tresse. $1 \text{ tex} = 1 \text{ g/km}$

La déformation nominale (nominal strain) ε est utilisée pour cette étude :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0}$$

Avec:

- l_0 : Longueur initiale
- l : Longueur actuelle

2.3.3 Protocoles de pré-étirage

Différents types de pré-étirage sont étudiés ici, afin de déterminer l'importance du chemin de chargement, cf Figure 6. Ainsi les 3 protocoles de pré-étirage testés ici sont :

- CD : Charge/Décharge
- 10CD : 10 cycles Charge/Décharge
- R : Relaxation

Après chaque pré-étirage, une relaxation de 1heure est effectuée suivi d'un essai de traction monotone. Les efforts de pré-étirage varient de la façon suivante : 10%, 30% et 50% de la charge à rupture (MBL).

Ces différents pré-étirages sont testés sur la tresse, le brin et le filament. En anglais un pré-étirage se nomme bedding-in (BI), sur certaines figures 'Without BI' signifie (sans pré-étirage)

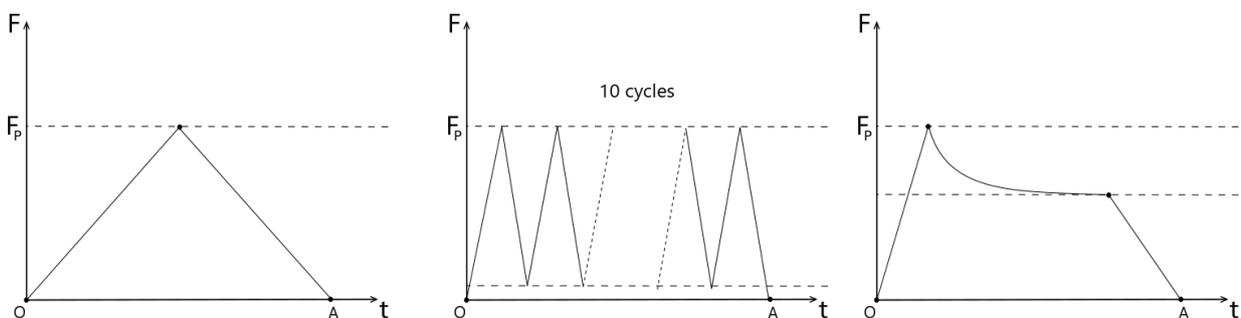


Figure 6. Protocoles de pré-étirages

3. RESULTATS

3.1 RESULTATS SANS PRE-ETIRAGE

La figure 7 montre les résultats pour les différentes échelles pour une traction monotone jusqu'à rupture.

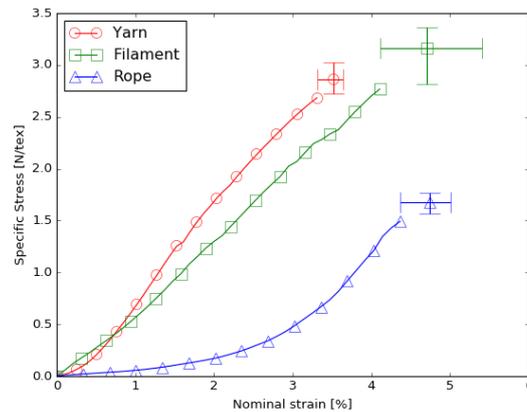


Figure 7. Traction monotone sans pré-étirage pour chaque échelle de la tresse

Ces courbes de traction nous montrent bien l'importance de la construction sur la réponse mécanique des cordages en HMPE. Le module initial de la tresse est très faible comparé à ceux du brin et du filament. Cela est dû à la construction de la tresse, les fibres viennent se réorganiser dans le sens de sollicitations de la tresse. De ce fait, on retrouve une déformation à rupture plus importante au fur et à mesure que l'on passe à une échelle plus importante. Concernant la contrainte à rupture, l'assemblage des fibres tend à les fragiliser et à provoquer des concentrations de contraintes provoquant une rupture prématurée de l'assemblage. Ainsi on retrouve une contrainte à rupture plus importante pour le filament que pour le brin ou encore la tresse.

3.2 RESULTATS AVEC PRE-ETIRAGE SUR TRESSE

Les figures 8 nous montrent l'influence des différents niveaux de pré-étirage sur l'échelle de la tresse.

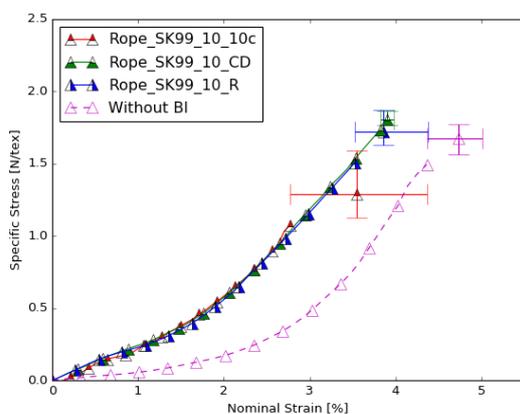


Figure 8. a. Résultats pour un effort de pré-étirage à 10% de la MBL

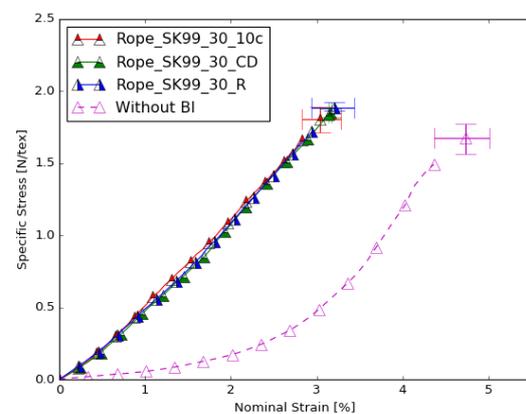


Figure 8. b. Résultats pour un effort de pré-étirage à 30% de la MBL

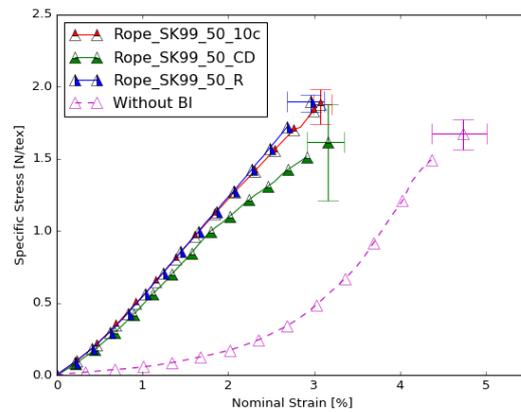


Figure 8. c. Résultats pour un effort de pré-étirage à 50% de la MBL

Ces figures nous montrent la forte influence du pré-étirage sur la réponse mécanique de la tresse. Le niveau de charge du pré-étirage joue également un rôle important. Tandis que le rôle du type de pré-étirage quant à lui joue un rôle minime. A partir d'un pré-étirage à 30% de la MBL, la courbe de réponse en traction de la tresse est linéaire.

3.3 COMPARAISON SUR LES DIFFERENTES ECHELLES

Les figures 9 montrent l'ensemble des résultats d'essais, chaque courbe représente une moyenne de 3 essais. Elles permettent la comparaison de l'influence de l'effort de pré-étirage ainsi que l'influence du type de chargement sur les réponses mécaniques des différentes échelles à une traction monotone.

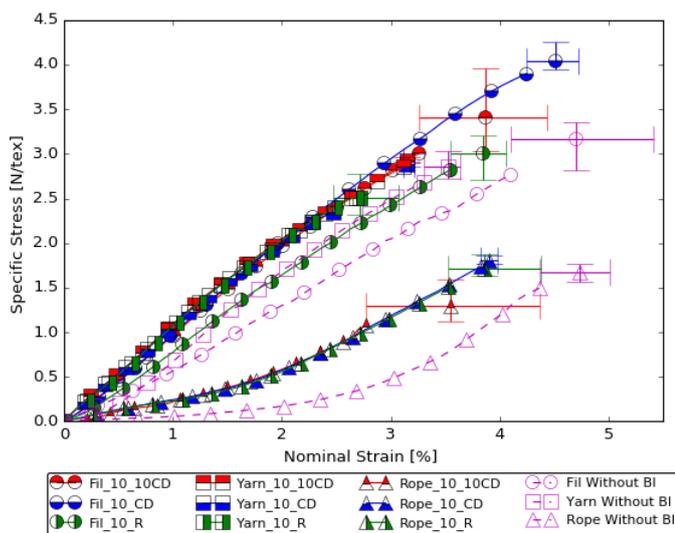


Figure 9.a. Traction après un pré-étirage à 10% de la MBL

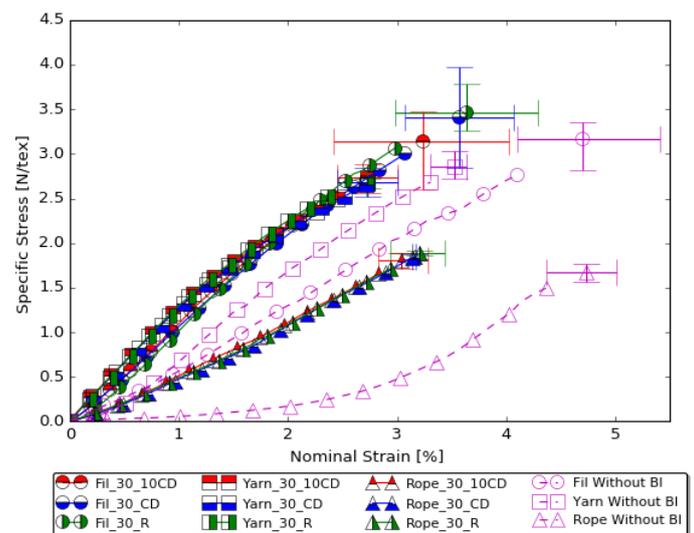


Figure 9.b. Traction après un pré-étirage à 30% de la MBL

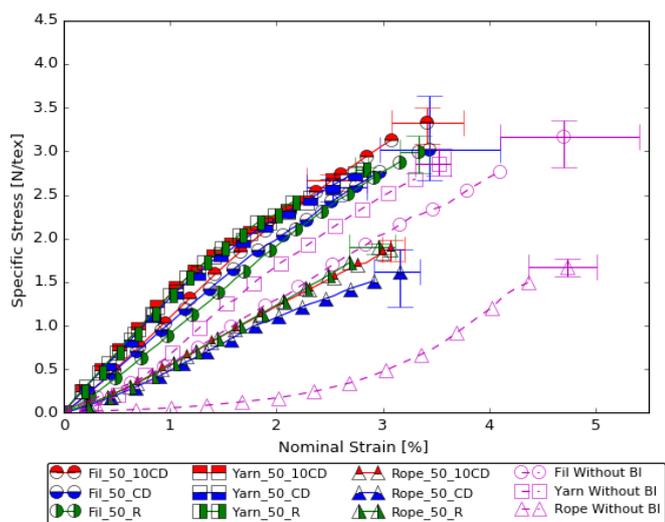


Figure 9.c. Traction après un pré-étirage à 50% de la MBL

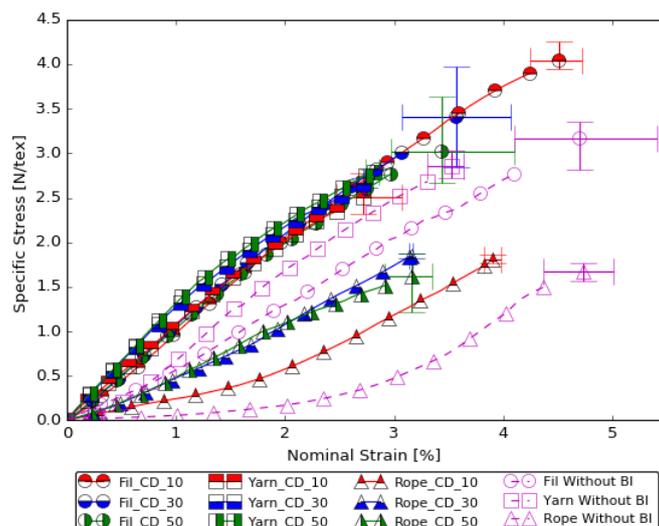


Figure 9.d. Traction après un pré-étirage Charge/Décharge

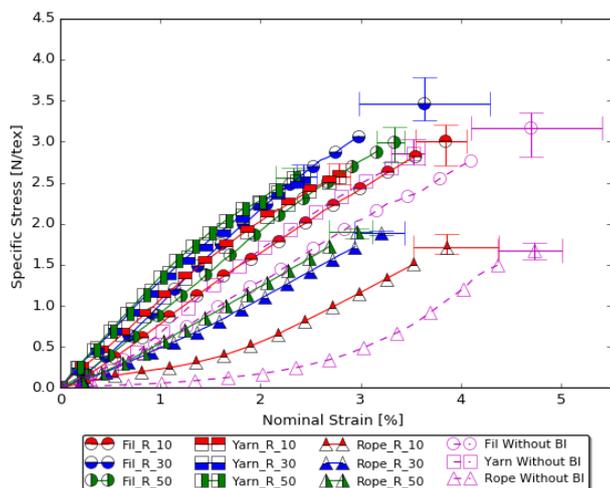


Figure 9.e. Traction après un pré-étirage Relaxation

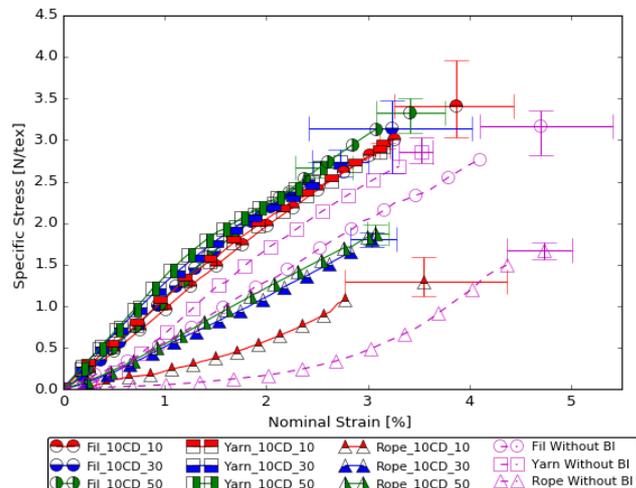


Figure 9.f. Traction après un pré-étirage 10 cycles Charge/Décharge

On remarque que pour chacune des échelles, le pré-étirage influe sur la réponse mécanique de la traction monotone notamment sur le module initial, la déformation à rupture mais également sur la contrainte à rupture.

Les figures 9.a, 9.b et 9.c, montrent le peu d'influence du type de pré-étirage sur la réponse mécanique qu'importe l'échelle testée. Avec un pré-étirage à 10% de la MBL à l'échelle de la tresse, la réponse mécanique reprend la même allure que celle sans pré-étirage. Cependant on remarque qu'à partir d'un pré-étirage supérieur à 30% de la MBL, on a une réponse mécanique qui tend à être linéaire et à se rapprocher de la réponse mécanique d'un filament. La construction tend à jouer un rôle de moins en moins important au fur et à mesure que l'on augmente l'effort de pré-étirage.

	% of MBL	Déformation Rémanente en %		
		CD	Relax	10CD
Filament	10%	0,17	0,45	0,52
	30%	0,40	0,81	0,90
	50%	0,70	1,42	1,05
Brin	10%	1,01	0,97	1,06
	30%	1,25	1,13	1,32
	50%	1,41	1,40	1,46
Tresse	10%	1,84	1,93	2,11
	30%	2,56	2,84	2,95
	50%	2,97	3,00	3,71

Tableau 2. Valeur de la déformation rémanente pour chaque échelle

La déformation permanente des cordages synthétiques est le résultat de 2 types de déformation: la déformation due à la construction et celle du matériau. La déformation permanente reliée à la construction peut être expliquée par le réaligement des fibres dans la direction de chargement (Humeau, 2017), (Williams et al., 2002). Cette déformation rémanente tend à augmenter avec l'effort de pré-étirage, comme l'observation faite sur l'évolution de la réponse mécanique de la tresse suivant l'effort de pré-étirage. La contribution du matériau (les filaments) représente moins de 30% de la déformation rémanente totale du cordage.

4. Conclusions et perspectives

Les différents résultats obtenus lors de cette étude permettront de décorrélérer l'influence de la construction et du matériau sur la réponse d'un cordage tressé. De plus l'influence de l'historique du chargement sur la réponse mécanique a également été quantifiée. Les conclusions suite à ces essais seront présentées lors de la présentation au CFM mais également dans un article plus détaillé. Le but de cet article étant d'introduire l'objectif final de l'étude et les différents résultats obtenus. Ces derniers sont nombreux et ont nécessité un temps de recherche pour les représenter. Les premières conclusions que nous pouvons en tirer sont que l'on peut observer une nette distinction entre la réponse mécanique de différentes échelles de la tresse. De plus l'historique de chargement influe sur chaque échelle de la tresse. Notamment l'effort de pré-étirage qui tend à diminuer l'influence de la construction sur la réponse mécanique du matériau et ainsi à le stabiliser. La déformation rémanente est dominée par la construction, plutôt que la réponse des fibres.

D'autres conclusions peuvent également être apportées en se penchant sur les autres données extraites. Elles seront discutées par la suite, ainsi que des observations sur l'évolution du pas de tressage lors du pré-étirage et sur l'évolution du diamètre apparent qui peuvent appuyer ces premières conclusions.

Références

American Bureau of Shipping (ABS), 2011. Guidance notes on the application of fiber ropes in the offshore mooring. ABS Press 29–40.

Banfield, S., Casey, N., 1998. Evaluation of fibre rope properties for offshore mooring. Ocean Eng. 25, 861–879.

- Bureau Veritas, 2007. Certification of Fibre Ropes for Deepwater Offshore Services.
- Casey, N.F., Banfield, S.J., 2005. OTC 17068 Factors Affecting the Measurement of Axial Stiffness of Polyester Deepwater Mooring Rope Under Sinusoidal Loading. *Offshore Technol. Conf.* 1–12.
- Casey, N.F., Belshaw, R., Paton, A.G., Hooker, J., 2000. OTC 12177 Short- and Long-Term Property Behaviour of Polyester Rope. *Offshore Technol. Conf.* 1–12.
- Chailleux, E., Davies, P., 2005. A Non-Linear Viscoelastic Viscoplastic Model for the Behaviour of Polyester Fibres. *Mech. Time-Dependent Mater.* 9, 147–160.
- Davies, P., Bouquet, P., Conte, M., Deuff, A., 2006. OTC 17872 Tension / Torsion Behavior of Deepwater Synthetic Mooring Lines. *Offshore Technol. Conf.* 1–8.
- Davies, P., François, M., Veritas, B., Ifp, F.G., Baron, P., Engineering, D., Salomon, K., Offshore, B., Technip, D.T., 2002. OTC 14246 Synthetic Mooring Lines for Depths to 3000 Meters. *Offshore Technol. Conf.* 1–9.
- Del Vecchio, C.J.M., 1992. *Light Weight Materials for Deep Water Moorings.* University of Reading.
- Fer, F., 1971. *Thermodynamique macroscopique.* Gordon Breach Sci. Publ.
- Ghoreishi, S.R., 2005. *Modelisation analytique et caracterisation experimentale du comportement de cables synthetiques.* Ecole Centrale de Nantes.
- Ghoreishi, S.R., Davies, P., Cartraud, P., Messenger, T., 2007. Analytical modeling of synthetic fiber ropes. Part I: A linear elastic model for 1 + 6 fibrous structures. *Int. J. Solids Struct.* 44, 2943–2960. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2006.08.032>
- Hooker, J., Bosman, R.L.M., 1999. *Recent Investigation into the Physical Properties of Superline Polyester Ropes. Moorings Anchors Deep Ultra Deep Water Fields.*
- Hoppe, L.F.E., 1991. *Modelling the static loading behavior of Dyneema in wire-rope construction.* DSM Res.
- Humeau, C., 2017. *Contribution to the study of coupling between moisture diffusion and mechanical stress, in high performance marine.* Université de Nantes.
- International Standards Organization (ISO), 2004. *Fibre ropes for offshore station keeping — Polyester, ISO 18692.*
- Lechat, C., 2007. *Comportement mécanique de fibres et d'assemblages de fibres en polyester pour cables d'amarrage de plates-formes offshore.* Ecole des Mines de Paris.
- Leech, C.M., Hearle, J.W.S., 1993. *Modelling Tension and Torque Properties of Fibre Ropes and splices.* *Int. Offshore Polar Eng. Conf.* 6–11.
- Lian, Y., Liu, H., Li, L., Zhang, Y., 2018a. An experimental investigation on the bedding-in behavior of synthetic fiber ropes. *Ocean Eng.* 160, 368–381. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.04.071>
- Lian, Y., Zheng, J., Liu, H., Xu, P., Gan, L., 2018b. A study of the creep-rupture behavior of HMPE ropes using viscoelastic-viscoplastic-viscodamage modeling. *Ocean Eng.* 162, 43–54. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.05.003>
- Liu, H., Huang, W., Lian, Y., Li, L., 2014. *An experimental investigation on nonlinear behaviors of*

- synthetic fiber ropes for deepwater moorings under cyclic loading. *Appl. Ocean Res.* 45, 22–32. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2013.12.003>
- Raouf, M., Hobbs, R.E., 1988. Analysis of Multilayered Structural Strands 114, 1166–1182. REF ?
- Rawal, A., Sibal, A., Saraswat, H., Kumar, V., 2015. Geometrically controlled tensile response of braided sutures. *Mater. Sci. Eng. C* 48, 453–456, <https://doi.org/10.1016/j.msec.2014.12.043>
- Vlasblom, M., 2018. 18 - The manufacture, properties, and applications of high-strength, high-modulus polyethylene fibers, *Handbook of Properties of Textile and Technical Fibres*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101272-7.00018-3>
- Vu, T.D., Durville, D., Davies, P., 2015. Finite element simulation of the mechanical behavior of synthetic braided ropes and validation on a tensile test. *Int. J. Solids Struct.* 58, 106–116. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2014.12.022>
- Weller, S.D., Davies, P., Vickers, A.W., Johanning, L., 2014. Synthetic rope responses in the context of load history : Operational performance. *Ocean Eng.* 83, 111–124. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.03.010>
- Williams, J.G., Ceac, H., Miyase, A., Ceac, H., Li, D., 2002. Small-Scale Testing of Damaged Synthetic Fiber Mooring Ropes. *Offshore Technol. Conf.* 1–13.