

Les cordages : composites sans matrices

Ropes: composites without matrix

Peter Davies

Laboratoire SMASH
IFREMER
Centre Bretagne, F- 29280 Plouzané
peter.davies@ifremer.fr

Résumé

Les cordages synthétiques sont des composites sans matrices. On retrouve les fibres orientées mais la géométrie est plus mobile, dépendant de l'historique des chargements et des interactions entre fibres. Ces interactions contrôlent également la durabilité, notamment la résistance en fatigue. Cet article présente un aperçu de l'utilisation de ce type de matériau en milieu marin, avec des exemples d'études en cours.

Abstract

Synthetic fibre ropes can be considered as composites without the matrix resin. They are composed of oriented fibres but their geometry is less stable, depending on the loading history and the interactions between fibres. These interactions also control the durability and the long term behaviour. This paper provides an overview of the use of this type of material in marine applications and presents some examples of recent studies.

Mots Clés : fibres, cordages, terminaison, fatigue, durabilité

Keywords : fibres, ropes, terminations, fatigue, durability

1. Introduction

Les cordages forment un sous-groupe important de la grande famille des matériaux composites. Composés d'assemblages de fibres, en générales synthétiques, ils sont essentiels pour de nombreuses applications marines. On les retrouve dans les lignes d'ancrage de plateformes pétrolières, les engins de pêche ou les lignes d'instrumentation océanographiques. Et plus récemment on constate un intérêt pour ces structures dans différents systèmes de récupération d'énergie en mer, notamment les lignes d'amarrage des éoliens flottants [1]. D'un point de vue historique une première référence « moderne » est celle de Duhamel du Monceau [2], qui publie en 1747 un ouvrage intitulé « L'Art de la Corderie perfectionné ». Au dix-huitième siècle on utilisait surtout les fibres de chanvre pour les cordages de navires, Figure 1, et la production passait de l'artisanale à l'industrielle.



Fig. 1. 40 km de cordages en chanvre sur le navire « Victory ».

Les sollicitations auxquelles les cordages sont soumis sont principalement des tractions, mais pour la manutention ou les gréements on retrouve souvent la flexion répétée sur poulie. Les chargements vont de quasi-statique et fluage à la dynamique. Par rapport aux composites imprégnés l'absence de matrice a deux conséquences importantes :

- D'abord la transmission des chargements entre renforts à l'intérieur du cordage se fait plutôt par contact direct entre fibres. Les phénomènes de frottement et abrasion interne sont primordiaux dans la durabilité.
- Ensuite, les positions des fibres sont moins figées, ce qui peut engendrer des évolutions importantes dans les orientations en fonction des sollicitations.

On utilise beaucoup de fibres différentes dans ces applications, notamment des polyoléfines, polyamides, polyesters, polyéthylène haut module (HMPE), et aramides. L'objectif des études réalisées à l'Ifremer dans ce domaine est, pour chaque famille de fibres ;

- De caractériser d'abord la réponse en tant que matériau (fibres),
- Ensuite d'aborder l'influence de la structure du cordage, en intégrant sa géométrie à différents échelles (brins, brins assemblés, torons, sub-ropes et cordages complets),
- D'évaluer leur durabilité sous chargements représentatifs des applications en mer, et
- D'investiguer l'impact environnemental de ces structures, afin de limiter leurs effets négatifs sur le milieu marin.

Il faut souligner que les diamètres des cordages utilisés en mer passent du millimètre, pour certaines tresses employées dans les filets de pêche, à plus de 200mm pour un cordage d'ancrage de plateforme de force à la rupture supérieure à 1000 tonnes, Figure 2.



Fig. 2. Gamme des échelles des cordages marins : de la tresse de diamètre 2mm, (photo MEB à gauche), aux lignes d'ancrage de centaines de mm (à droite).

2. Propriétés des fibres

La Figure 3 présente les familles de fibres employées couramment dans les cordages marines.

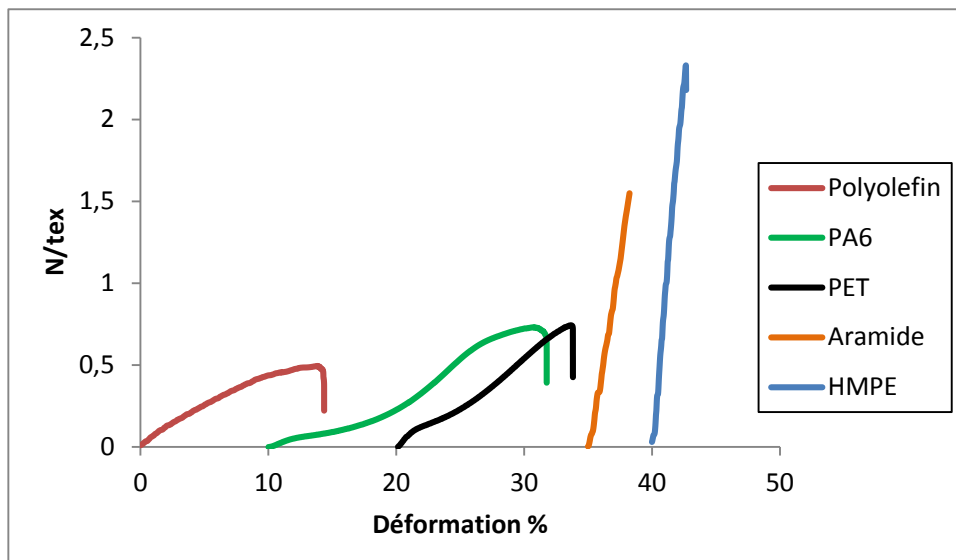


Fig. 3. Comportement en traction quasi-statique des fibres employées en mer. Courbes décalées sur l'abscisse.

On constate une gamme de propriétés très étendue, et chaque famille est composée de plusieurs grades (niveaux d'étirement, traitements thermiques, revêtements spécifiques...). Les réponses en traction sont plus ou moins non-linéaire et peuvent évoluer en fonction de l'historique de chargement. Ces propriétés sont obtenues sur des faisceaux de fibres afin de limiter la variabilité, mais on peut également travailler sur les filaments unitaires. La Figure 4 présente deux exemples de résultats d'essais sur filaments en HMPE et aramide, deux candidates pour les cordages de manutention grand fonds. On note des comportements très différents.

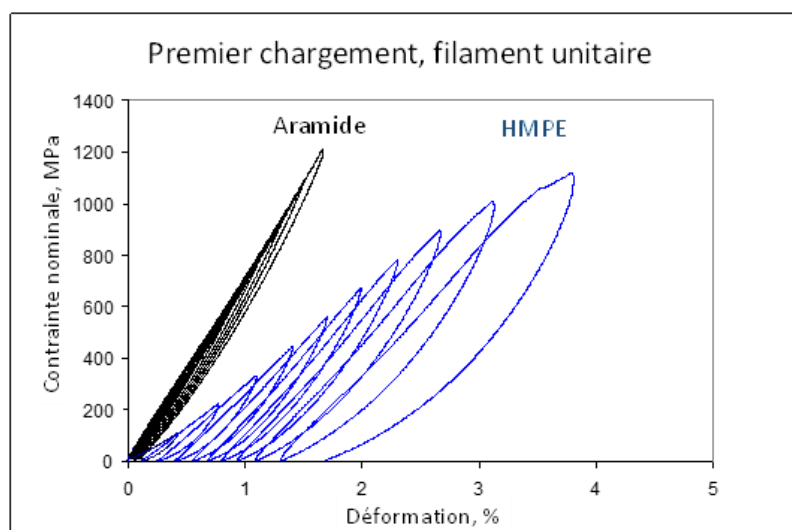


Fig. 4. Comportement en traction charge-décharge de deux filaments, aramide et HMPE [3].

3. Influence de la construction

L'intégrité des cordages dépend du toronnage de leurs composants, les rotations imposées par les machines de corderie aux différentes échelles de la structure. La Figure 3 présente deux exemples ; une tresse et un cordage toronné, et un exemple de gros cordage qui les combine.



Fig. 5. Deux constructions tressées et toronnées (à gauche) et combinées dans un cordage marin de gros diamètre, 160mm (à droite), cœurs toronnés dans une gaine tressée (construction « parallel strand »).

4. Exemples d'études de cordages marins

Pour illustrer brièvement quelques-unes des études réalisées dans ce domaine, trois cas sont présentés ci-dessous.

4.1 Manutention grand fonds

Plus en descende dans les profondeurs des océans moins les câbles de manutention en acier sont efficaces ; une partie croissante de leur capacité est prise par le poids propre du métal. Pour cette raison on utilise des cordages synthétiques pour le carottage et le dragage grand fonds (jusqu'à 6000mètres) depuis plus de 30 ans sur les navires de l'Ifremer mais c'est une application très exigeante. Les cordages passent sur des poulies, jusqu'à 10, entre le stockage et l'immersion. Tout mouvement du navire applique des chargements en flexion. Afin de mieux prédire la durée de vie de câbles synthétiques en flexion de nombreux essais ont été réalisés sur un banc spécifique [4], Figure 5, en parallèle avec des simulations [5],

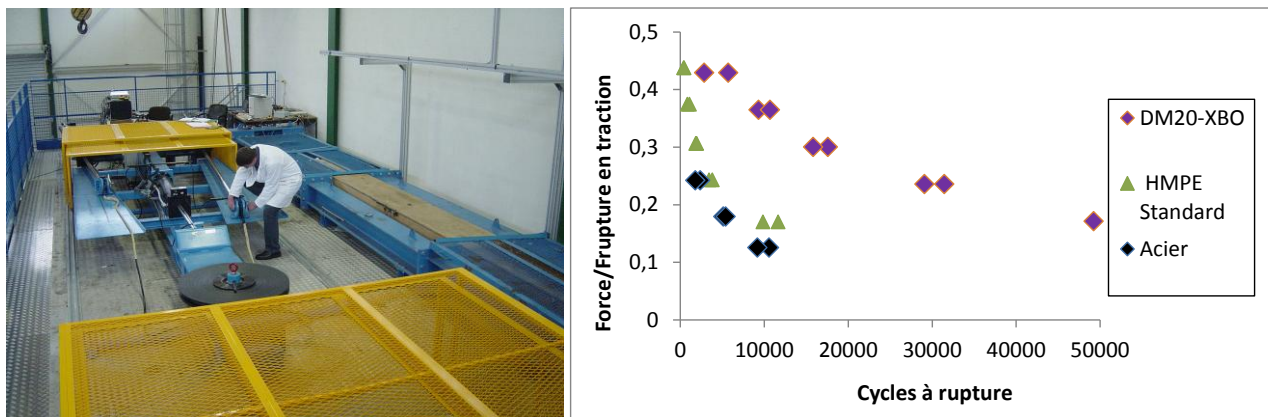


Fig. 5. Machine d'essai de cordage en flexion répétée (gauche), et exemple de résultats de durées de vie (droite).

La résistance en flexion du câble HMPE standard est similaire à celle d'un câble en acier de force à rupture similaire, mais en modifiant la fibre et le revêtement (DM20-XBO) on peut améliorer cette résistance de façon importante.

4.2 Ancrage d'éoliens flottants

En faible profondeur d'eau le maintien de position d'un éolien flottant en mer nécessite une certaine compliance des lignes d'ancrage, afin de limiter leurs sollicitations. Il s'avère que les cordages en polyamide 6 correspondent au cahier de charges, et plusieurs projets récents ont fait avancer nos connaissances de ce matériau [6,7]. Néanmoins, la forte non-linéarité de ce matériau, sa sensibilité à l'eau, et une performance en fatigue moyenne, posent des questions sur son choix. Ce dernier point fait l'objet de plusieurs études expérimentales en cours, Figure 6. Le rôle de revêtements spécifiques de protection sur les fibres s'avère critique pour assurer la durée de vie requise.

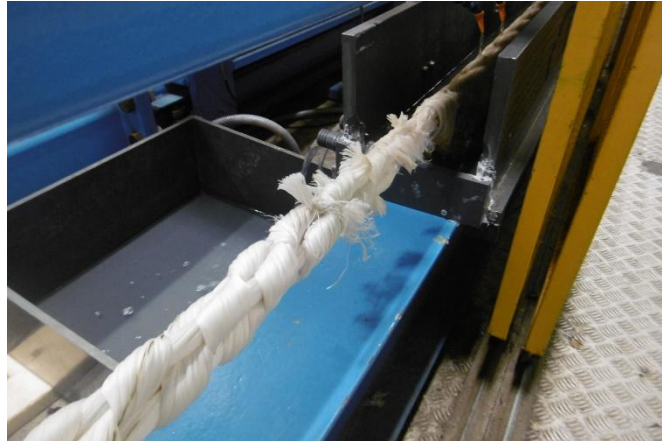


Fig. 6. Essai de fatigue en traction de sub-rope (environ 25 tonnes force à rupture quasi-statique) en PA6.

4.3 Gréements en composites

Parfois l'évolution des cordages retrouve le domaine des composites imprégnés plus traditionnels. C'est le cas de certains gréements de bateaux de course ou croisière, qui utilise les propriétés exceptionnelles des fibres de carbone alignées dans l'axe de traction. Dans ce cas les deux problématiques principaux sont l'équilibrage des tensions des différentes fibres pendant la fabrication et la conception d'une terminaison à moindre poids. La Figure 7 présente un exemple d'échantillon après essai en traction cyclique, la rupture a eu lieu dans la terminaison.



Fig. 7. Echantillon de gréement de bateaux de course en composite carbone unidirectionnel imprégné, après essai cyclique ; rupture dans la terminaison.

5. Durabilité

La durabilité est un point clé pour le dimensionnement. Tous les polymères sont modifiés par une immersion prolongée dans l'eau. Une des raisons pour l'adoption des fibres synthétiques au détriment des cordages à fibres naturelles était la sensibilité de ces dernières à l'humidité et la nécessité d'appliquer un goudron pour les protéger. Il faut donc tenir compte de l'évolution des propriétés des fibres dans le temps. En plus, pour une ligne d'ancrage en mer pendant 20 ans le nombre de cycles liés aux vagues peut dépasser 100 million, sans compter les tempêtes, ce qui pose un problème délicat pour la qualification. Pour qualifier les ancrages de plateformes pétroliers, et dans l'impossibilité de garantir une résistance en fatigue à ce nombre de cycles, (surtout avec un coefficient de sécurité imposé de 10), il a fallu finalement seulement démontrer que la durée de vie des cordages synthétiques dépassait celle des matériaux d'ancrages métalliques qu'ils remplaçaient [8]. C'est une approche pragmatique, mais ne permet pas de prédire leur durée de vie en service.

6. Impact environnemental

Aujourd'hui avant tout usage de nouveaux matériaux en mer on doit adresser plusieurs questions liées à l'environnement, le bilan ACV, la production éventuelle de micro- ou nano-plastiques [9] et la toxicité des formulations. Dans ce cadre on travaille également sur le développement de cordages mieux adaptés aux conditions en fin de vie. Par exemple un engin de pêche aura une durée de vie de 3 à 5ans, une DCP (dispositif de concentration de poissons) ou une ligne d'aquaculture d'environ 1 an. Dans ces cas l'excellente longévité des polymères synthétiques n'est pas forcément un prérequis [10]. Selon la récupération ou pas en fin de service, le choix de matériau peut s'orienter vers un cordage à fibre naturelle à base de cellulose (biodégradable en mer) ou un polymère biosourcé recyclable. Ces questions s'adressent également aux composites traditionnels et la fin de vie des polymères en mer est devenue un axe de recherche incontournable.

Remerciements

Les travaux sur les cordages décrits dans cet article ont été réalisés sur une période de plus de 20 ans, dans le cadre d'une dizaine de thèses (disponibles à [Archimer - Archive Institutionnelle de l'Ifremer](#)), de projets internes à l'Ifremer et de projets collaboratifs. L'auteur remercie les très nombreux collègues et collaborateurs qui ont contribué à ces études.

Références

- [1] Weller S.D. et al., Synthetic mooring ropes for marine renewable energy applications, *Renewable Energy*, 83, 1268-127, 2015.
- [2] Duhamel du Monceau HL, L'art de la corderie perfectionné, publié par Desaint, Paris, première édition 1747.
- [3] Davies P et al., Mechanical behaviour of HMPE and aramid fibre ropes for deep sea handling operations, *Ocean Engineering*, 38, 17–18, 2208-2214, 2011.
- [4] Davies et al, Improved Bend Over Sheave Durability of HMPE Ropes for Deep Sea Handling, *Proc OMAE*, <https://doi.org/10.1115/OMAE2018-77530>, 2018.
- [5] Vu TD et al, FE simulation of the mechanical behaviour of synthetic braided ropes, *IJSS*, 58, 106-116, 2015.
- [6] Civier L et al., Visco-elasto-plastic characterization and modeling of a wet polyamide laid-strand sub-rope for floating offshore wind turbine moorings, *Ocean Engineering*, 303, 117722, 2024.
- [7] Sorum SH et al., Assessment of nylon versus polyester ropes for mooring of floating wind turbines, *Ocean Engineering*, 278, 114339, 2023.
- [8] Bugg DL et al., Mad Dog Project: Regulatory Approval Process for the New Technology of Synthetic (Polyester) Moorings in the Gulf of Mexico, *Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, OTC-16089-MS, 2004.
- [9] Napper IE et al., Potential microplastic release from the maritime industry: Abrasion of rope, *Sci. of The Total Env.*, 804, 2022.
- [10] Le Gué L et al, Biodegradable twine for trawl fishing: Seawater ageing and net modelling *Mar. Poll. Bull.* 211,2025.