



PROTEGE



Fabrication de cordes en fibres de coco résistantes en milieu marin en Polynésie française

Rapport technique final

Polyacht – Vaihuti Fresh

Février 2024



Le projet régional océanique des territoires pour la gestion durable des écosystèmes, PROTEGE, est un projet intégré qui vise à réduire la vulnérabilité des écosystèmes face aux impacts du changement climatique en accroissant les capacités d'adaptation et la résilience. Il cible des activités de gestion, de conservation et d'utilisation durables de la diversité biologique et de ses éléments en y associant la ressource en eau. Il est financé par le 11^{ème} Fonds européen de développement (FED) au bénéfice des territoires de la Nouvelle-Calédonie, de la Polynésie française, de Pitcairn et de Wallis et Futuna.

L'objectif général du projet est de construire un développement durable et résilient des économies des pays et territoires d'Outre-mer (PTOM) face au changement climatique en s'appuyant sur la biodiversité et les ressources naturelles renouvelables.

Le premier objectif spécifique vise à renforcer la durabilité, l'adaptation au changement climatique et l'autonomie des principales filières du secteur primaire. Il est décliné en deux thèmes :

- Thème 1 : la transition agro-écologique est opérée pour une agriculture, notamment biologique, adaptée au changement climatique et respectueuse de la biodiversité ; les ressources forestières sont gérées de manière intégrée et durable.
- Thème 2 : les ressources récifo-lagonaires et l'aquaculture sont gérées de manière durable, intégrée et adaptée aux économies insulaires et au changement climatique.

Le second objectif spécifique veut renforcer la sécurité des services écosystémiques en préservant la ressource en eau et la biodiversité. Il se décline également en 2 thèmes :

- Thème 3 : l'eau est gérée de manière intégrée et adaptée au changement climatique
- Thème 4 : les espèces exotiques envahissantes sont gérées pour renforcer la protection, la résilience et la restauration des services écosystémiques et de la biodiversité terrestre.

La gestion du projet a été confiée à la Communauté du Pacifique (CPS) pour les thèmes 1, 2 et 3 et au programme régional océanique pour l'environnement (PROE) pour le thème 4, par le biais d'une convention de délégation signée le 26 octobre 2018 entre l'Union européenne, la CPS et le PROE. La mise en œuvre du projet est prévue sur 4 ans.

Ce rapport est cité comme suit :

Jean Pagny, Benoit Parnaudeau, Christophe Monnier et Thierry Lison de Loma (2024) Fabrication de cordes en fibres de coco résistantes en milieu marin en Polynésie française : rapport technique final – 55 pages avec les annexes.

Cette publication a été produite avec le soutien financier de l'Union européenne. Son contenu relève de la seule responsabilité de la SAS POLYACHT et ne reflète pas nécessairement les opinions de l'Union européenne.

Résumé exécutif :

Titre du rapport	Fabrication de cordes en fibres de coco résistantes en milieu marin en Polynésie française : rapport technique final
Auteurs	Jean Pagny, Benoit Parnaudeau, Christophe Monnier, Thierry Lison de Loma
Année d'édition	2024

Objectif	<p>L'objectif est de décrire les étapes et les choix techniques et d'études permettant la fabrication de cordage en fibre de coco résistante en milieu marin en Polynésie française. Ceci comprend la préparation et le traitement des fibres (rouissage, défibrage, tamisage, triage...), mais aussi l'outillage nécessaires, jusqu'à la méthode de confection de différents types de cordages. Il s'agit également de caractériser les cordages ainsi produits, tant en termes de résistance mécanique, que de vieillissement dans leur environnement d'utilisation.</p>
Contexte	<p>En Polynésie française, la coprahculture est une production dominante de l'agriculture. En 2022, la production de coprah s'élève à 8 950 tonnes qui ont servi pour la grande majorité à fabriquer de l'huile brute exportée vers la métropole et de l'huile raffinée pour la fabrication du monoï de Tahiti Appellation d'origine. Chaque année, 40 millions de noix de coco sont exploitées sur un gisement estimé à 60 millions de noix. Or aujourd'hui, seule la chair est utilisée pour la fabrication du monoï et exportée pour la cosmétologie. Les autres parties du fruit du cocotier telles que la bourre de coco et la tourbe sont considérée comme un déchet.</p> <p>Le projet Cocorig a été monté en 2020 dans le cadre du concours international d'innovation « Tech4Islands », événement dédié aux innovations résilientes pour les territoires insulaires. A l'époque, il reçoit le titre de second lauréat du concours pour son concept de transformer la fibre de coco en cordages. Aujourd'hui, le projet Cocorig est porté par POLYACHT, société d'expertise maritime spécialisé en gréement et cordages, et par Vaihuti Fresh, société d'agriculture biologique. En partenariat avec le projet PROTEGE, la Direction des ressources marines (DRM) et la Direction de l'agriculture (DAG), le projet vise à valoriser, par transformation mécanique, la bourre de coco afin de produire localement du terreau de semis à base de tourbe de coco ou des cordages à bases de fibres de coco. L'objectif final étant de proposer des solutions locales moins impactantes pour l'environnement.</p> <p>Le présent rapport clôture l'étude de faisabilité technique et économique du projet de fabrication de corde en fibre de coco résistante en milieu marin en Polynésie française. Dans cette étude, il a été demandé au prestataire POLYACHT de fabriquer de la corde en fibre de coco de 6-8 mm et de 12-15 mm en utilisant les fibres de coco sec et de développer une méthode de rouissage qui permette d'optimiser l'utilisation de cette corde en milieu marin. Il a également été demandé que la corde fabriquée soit caractérisée (durée de vie dans l'eau de mer, flottabilité, résistance à l'étirement, point de rupture, résistance aux UV).</p>

<p>Méthode</p>	<p>Afin d'étudier la faisabilité technique de la production de cordage en fibres de coco en Polynésie française, il a été nécessaire de :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Faire un état de l'art des connaissances locales en termes de confection de cordage coco (« <i>nape</i> », méthode de confection, de rouissage, sélection des cocos...) ; - Effectuer un échantillonnage de tests de rouissages (différentes durées, différentes eaux...) ; - Caractériser scientifiquement les fibres et les cordages (en laboratoire) ; - Acquérir des machines adaptées et en tester le fonctionnement ; - Adapter en continue les méthodes et process de traitement et de fabrication. <p>Pour la fabrication des cordages, une machine dite « toronneuse » a été achetée permettant de fabriquer des cordages de 2 fils toronnés, appelés « torons » dont le diamètre est 5 mm. Pour la fabrication de cordages de plus gros diamètre, nous avons établi un partenariat avec la Corderie H. LANCELIN. Par ailleurs, suite à différents tests, une vieille tresseuse mécanique a permis la réalisation de 500 m de cordage en fibre de coco de diamètre 10-12 et 500 m de diamètre 16-18. Elle est localisée dans les locaux de POLYACHT.</p> <p>D'autre part, pour connaître le comportement et le vieillissement des cordages en fibre de coco en milieu marin, nous avons établi des partenariats avec :</p> <ul style="list-style-type: none"> - IFREMER BREST - IFREMER VAIARE - FERME CHAMPON - CORAL GARDENER <p>Les objectifs de ces partenariats étaient de connaître l'impact du temps de rouissage, de comparer différentes méthodes de fabrication, de savoir quels sont les organismes qui se développent sur les cordages et d'évaluer l'impact de ces cordages sur le milieu marin, en laboratoire et dans le milieu naturel localement.</p>
<p>Principaux résultats</p>	<p>L'étude du rouissage, partie importante et nécessaire du procédé d'obtention des fibres, visant à faciliter la séparation de la fibre et de l'épicarpe, montre que le temps ou le milieu (eau douce ou salée), n'a aucune influence sur la résistance de la tresse. En effet, la modification de la fibre par le rouissage est trop faible par rapport à l'impact lié à la qualité de fabrication du cordage. Il est préférable d'effectuer le rouissage en eau douce, car l'utilisation de la tourbe pour la confection de terreau de semi est compromise si la salinité est trop importante. De plus, le sel nuit aux machines.</p> <p>La qualité et surtout la technique de confection du cordage a un impact sur la durabilité : le tressage est clairement plus performant pour la résistance en milieu marin que le toronnage.</p> <p>La résistance en milieu marin dépend de l'origine géographique de la fibre, et surtout du lieu où elle est immergée. Les fibres provenant de Raiatea ont subi une forte détérioration lors de leur immersion à Brest, ce qui n'est pas le cas quand on les immerge dans le lagon de Raiatea.</p> <p>L'étude des différents paramètres de confection des cordages démontrent l'importance de la qualité du tressage pour l'optimisation de leur résistance à</p>

	<p>l'état sec comme mouillé. Un bon tressage améliore également la durabilité des cordages immergés en eau de mer.</p> <p>Les organismes vivants dans l'eau de mer se développent beaucoup plus vite sur un cordage en fibre de coco que sur un cordage en plastique bas de gamme.</p>
<p>Limites de l'action</p>	<p>La qualification de la résistance en milieu marin des cordages produits nécessite du temps, notamment pour les tests en conditions réelles. La durée du programme ne nous a malheureusement laissé que le temps d'effectuer des tests de vieillissement accéléré en laboratoire. Les tests de résistance ayant mis en lumière la dépendance à l'environnement d'immersion, des tests complémentaires sont nécessaires.</p> <p>La maîtrise complète des machines, en particulier la toronneuse et la tresseuse, nécessite encore une fois du temps et de l'expertise. Les cordages produits dans le cadre du présent projet, bien qu'étants de bonne facture, verront leur qualité croître avec le temps et l'expérience des opérateurs. Cette montée en qualité aura elle aussi un impact sur la résistance des cordages, notamment en milieu marin.</p> <p>Un objectif non négligeable du projet étant de valoriser un déchet de la culture de coprah, il est à garder à l'esprit que la sélection des noix, notamment leur maturité (coco brune uniquement), et leur variété (pas nécessairement celles ayant les fibres les plus longues), n'a pas été un critère prépondérant dans la technique de fabrication. Ce document ne couvre donc pas l'entièreté du panel de qualité de cordages pouvant être fabriqués localement.</p>



Remerciements

Nous remercions les agents de la Communauté du Pacifique, de la Direction des Ressources Marines et de la Direction de l'Agriculture de Polynésie française pour leur disponibilité, leur écoute et leur patience. Ils ont su nous accompagner, nous orienter et nous recadrer quand cela était nécessaire, les échanges se sont toujours faits en toute transparence et les informations qu'ils nous ont fournies ont été précieuses.

Un clip vidéo a pu être réalisé et le projet a été mis en avant dans diverses émissions télévisées locales et sur la toile, ceci a été rendu possible grâce à Muriel Puntarolo, qui nous a permis de rentrer dans la French Tech de Polynésie française et participer à Tech4Island ainsi que par le Cluster maritime de Polynésie française, représenté par Anne-Maï Do-Chi, sa secrétaire générale.

A noter aussi le soutien de la CCISM, qui nous a permis de communiquer sur le projet COCORIG à l'occasion du salon nautique du Grand Pavois de La Rochelle en France.

Remerciement également à Peter Davies de l'IFREMER Brest et Guillaume Mitta de l'IFREMER de Vairao, pour avoir accepté avec enthousiasme la participation de l'IFREMER à ce programme.



Table des matières

1) Introduction.....	11
2) Méthode de fabrication.....	12
A. Rouissage.....	13
B. Gestion du taux d'humidité des demi-noix de coco	15
C. Passage dans la défibreuse	16
D. Passage dans le Tamis	17
E. Séchage de la fibre	19
F. Tri de la fibre.....	19
G. Passage au peigne	20
H. Passage dans la toronneuse.....	21
I. Tressage.....	23
3) Les cordages en fibre de coco	25
A. Intérêt	25
B. Toron / Tresse.....	26
C. Propriétés mécaniques des cordages produits.....	27
4) Propriétés mécaniques des cordages en fibres de coco détaillées.....	29
A. Observations MEB.....	29
B. Essais à l'échelle de la fibre.....	30
C. Distribution des longueurs de fibres dans les différents cordages	32
D. Essais mécaniques à l'échelle du cordage	33
E. Absorption d'eau par les fibres de coco.....	35
F. Impact de la saturation en eau sur les propriétés du cordage	35
G. Impact du rouissage sur les propriétés	37
H. Vieillessement des cordages	39
I. Conclusion de l'IFREMER de Brest	41
5) Impact environnemental des cordages en fibres de coco.....	42
A. Matériel et Méthode	42
B. Résultats.....	43
a. Toxicité	43
b. Biais expérimentaux	43
c. Dynamique de colonisation	44
d. Biais expérimentaux	44
C. Conclusions de l'IFREMER de Vairao.....	44



5) Conclusion et perspectives.....	46
6) Annexes.....	48
A. Annexe 1 : Fiche TORON, exemple code n° T6DR1EM3ED3.....	48
B. Annexe 2 : Fiche PROTO, exemple code n° P6T6DR1EM3ED3	49
C. Annexe 3 : Fiche technique défibreuse.....	50
D. Annexe 4 : Fiche technique tamis.....	51
E. Annexe 5 : Fiche technique toronneuse.....	52
F. Annexe 6 : Fiche technique bobineuse	53
G. Annexe 7 : Fiche technique tresseuse.....	54



Table des Figures

- Figure 1 - Atelier
- Figure 2 - Différents rouissages
- Figure 3 - Noix de coco en séchage
- Figure 4 – Défibreuse
- Figure 5 - Chargement de la défibreuse
- Figure 6 - Fibres longues en sortie de défibreuse
- Figure 7 - Fibres longues en sortie de défibreuse
- Figure 8 - Chargement de fibres dans le tamis
- Figure 9 – Fibres à l'intérieur du tamis
- Figure 10 - Fibres en sortie de tamis
- Figure 11 - Fibres en séchage
- Figure 12 - Tri manuel des fibres pour en retirer l'épicarpe
- Figure 13 - Chargement des fibres dans le peigne
- Figure 14 - Peigne
- Figure 15 - Toronneuse
- Figure 16 - Fils et torons
- Figure 17 - Torons et bobinage
- Figure 18 – Bobines de fils toronnés et bobine de guide (fil de lin à droite)
- Figure 19 – Bobinage et fil toronné
- Figure 20 - Bobineuse
- Figure 21 - Bobines prêtes à être tressés
- Figure 22 - Tresseuse
- Figure 23 – Cordage tressé
- Figure 24 – Toron
- Figure 25 – Tresse
- Figure 26 - Tressages possibles - charges de ruptures (CR) - diamètres
- Figure 27 - Différents cordages fabriqués au cours du projet
- Figure 28 - Cordages pour l'Ifremer de Brest
- Figure 29 - Observations MEB de la surface des différents échantillons
- Figure 30 - tylose bouchant un pore de la fibre de coco
- Figure 31 - courbes de traction pour les fibres de coco et un monofilament de PE-HD
- Figure 32 - Synthèse des résultats des essais sur fibre seule.
- Figure 33 - faciès de rupture d'une fibre de coco sollicitée en traction.
- Figure 34 - distribution des longueurs et des diamètres de fibre dans les différents cordages.
- Figure 35 - Longueurs et diamètres moyens des cordages étudiés.
- Figure 36 - échantillon du cordage [coco-m] (a) avant et (b) après avoir été testé mécaniquement, (c) échantillons du cordage [coco-r] placé sur le montage avec des rouleaux.
- Figure 37 - exemple de courbes de traction pour chaque cordage.
- Figure 38 - Synthèse des résultats pour les différents cordages testés en traction.
- Figure 39 - (a) paliers d'humidité imposés et prise de masse, (b) courbe d'absorption d'eau correspondante
- Figure 40 - Synthèse des résultats pour les essais sur cordages secs et mouillés.
- Figure 41 - courbes de traction à l'état sec et mouillé pour le (a) le cordage [coco-m], (b) le cordage [coco-i].

Figure 42 - (a) schéma de la structure d'une noix de coco, (b) observation MEB d'une fibre entourée du tissu cellulaire.

Figure 43 - évolution des propriétés mécaniques du cordage [coco-r] en fonction de la durée de rouissage en eau de mer et en eau douce.

Figure 44 - observation MEB sur des fibres du cordage [coco-r] (a) à l'état initial, (b) rouies 3 mois en eau de mer ($t_{EM} = 3$, $t_{ED} = 0$), (c) rouies 3 mois en eau douce ($t_{EM} = 0$, $t_{ED} = 3$), (d) rouies 3 mois en eau de mer puis 3 mois en eau douce ($t_{EM} = 3$, $t_{ED} = 3$)

Figure 45 - évolution de l'effort à rupture en fonction du temps d'immersion à plusieurs températures

Figure 46 - observations MEB des fibres de [coco-m] après 6 mois de vieillissement à 25°C.

Figure 47 - Photographies macro des cordages de (a) coco, (b) coco/trossard, (c) dyneema et (d) polyéthylène



1) Introduction

Le projet « Fabrication de cordages en fibre de coco en Polynésie française, résistants en milieu marin » soumis à l'appel à projet de la Communauté du Pacifique dans le cadre du programme PROTEGE émane du projet COCORIG de valorisation des déchets de la coprahculture, porté par les sociétés POLYACHT et VAIHUTI FRESH.

Le choix, n'est donc pas de fabriquer un cordage haut de gamme en sélectionnant les noix de coco adéquates, mais bien de récupérer et valoriser les demi-noix de coco laissées par les coprahculteurs pour fabriquer les cordages. En effet, la Polynésie étant un territoire insulaire, quantité de cordages plastiques y est importée et immergée. La confection de cordages en fibre de coco permet d'offrir une alternative naturelle et locale à ces cordages, permettant de s'affranchir du transport, du plastique, de proposer un complément de revenus au coprahculteurs et de créer de l'emploi.

Fabriquer des cordages en fibre de coco n'est pas une nouveauté, l'Inde en a fait une industrie depuis 150 ans et les Polynésiens tressent traditionnellement du *Nape* à la main depuis toujours. La difficulté dans ce projet se trouve dans la résistance en milieu marin des cordages.

Le présent rapport vient compléter deux livrables antérieurement fournis, une recherche sur le savoir-faire polynésien, ainsi qu'une étude de faisabilité économique sur l'implantation d'une production industrielle de cordages en fibre de coco en Polynésie française.

Les objectifs techniques du projet étant de vérifier la possibilité de fabriquer du cordage en fibre de coco en Polynésie française, d'en définir la meilleure méthode de fabrication, et d'en qualifier les produits en résistance et vieillissement en milieu marin, nous avons procédé par étapes.

Nous avons tout d'abord étudié et mis au point une méthode de fabrication, du rouissage au tressage, mais également étudié les caractéristiques intrinsèques des fibres et des cordages, notamment en milieu marin.

Ce sont ces différentes étapes que nous allons vous présenter dans la suite de ce rapport.



2) Méthode de fabrication

Nous présenterons ici le procédé mis en place suite aux premières étapes du projet, à savoir, entre autres, la mise en place de la machinerie nécessaire, de différentes « recettes » de rouissage, des tests de vieillissement, et des premiers essais de fabrication de cordages.

Nous y exposons l'état présent de la méthodologie de fabrication de cordage telle que nous la pratiquons, en prenant soin d'indiquer les limites et difficultés rencontrées.



Figure 1 - Atelier



A. Rouissage

On appelle « rouissage » le fait de faire macérer une plante textile dans l'eau douce ou dans l'eau de mer. Concernant le coco, cela permet d'une part, de faciliter la séparation de l'écorce filamenteuse (appelée épicarpe) et de la fibre et, d'autre part, cela provoque une série de réactions chimiques ou changements d'état grâce auxquels la fibre de coco acquiert une meilleure solidité.

Certaines littératures documentées au cours du projet insistent sur l'importance de la phase de rouissage qui serait essentielle pour la qualité de la fibre et sa durée de vie. Autant une fibre longue produira un cordage plus résistant à la traction qu'un cordage à base de fibres plus courtes ; autant la tenue dans le temps (que ce soit dans l'air ou dans l'eau) des cordages en fibre de coco dépendra du rouissage.

Des échanges avec Christophe Mary, français installé en Inde du Sud produisant des cordages en fibre de coco suivant les critères du commerce équitable, ont permis de dégager les premières pistes de réflexion. Selon lui, pour qu'un cordage soit résistant en milieu marin, le temps de rouissage doit être de 9 mois en eau de mer et 3 mois en eau douce.

La durée du programme PROTEGE ne nous permettant pas de suivre ces recommandations tout en ayant le temps de faire subir à la fibre et aux cordages réalisés avec cette fibre, des tests de vieillissement, nous lui en avons acheté quelques centaines de mètres de deux diamètres différents, 10 mm et 15 mm. Ces cordages nous ont servi en particulier à réaliser des tests en laboratoire et en situation, décrits dans les chapitres suivants.

Par ailleurs, dans l'optique de la création d'une filière industrielle de production de cordage en fibre de coco, ces durées de 9 mois en eau de mer et 3 mois en eau douce sont difficilement envisageables. En effet, les volumes de bourre de coco ou de fibre à mettre en rouissage dans un cadre industriel avec ces durées imposeraient des espaces lagunaires (rouissage en eau de mer), puis des bassins sur terre (eau douce) de très grandes dimensions. La situation foncière en Polynésie française, incomparable à celle des grands pays producteurs de cordage à base de fibre de coco et dont la plupart réalisent d'ailleurs une phase de rouissage courte, ne le permet pas.

La littérature étudiée, en revanche, ne fournit aucune donnée chiffrée permettant de déterminer l'impact de la durée du temps de rouissage sur la résistance dans le temps du cordage. C'est l'un des objectifs de ce programme.

Nous avons donc, pour cette partie, réalisé 13 rouissages différents :

REF	DUREE ROUISSAGE EN EAU DE MER	DUREE ROUISSAGE EN EAU DOUCE
EM02ED025	1 SEMAINE	1 SEMAINE
EM05ED025	2 SEMAINES	1 SEMAINE
EM07ED025	3 SEMAINES	1 SEMAINE
EM6ED1	6 MOIS	1 MOIS
EM4ED1	4 MOIS	1 MOIS
EM3ED3	3 MOIS	3 MOIS
EM0ED3	0	3 MOIS
EM3ED0	3 MOIS	0
EM2ED0	2 MOIS	0
EM1ED0	1 MOIS	0
EM2ED1	2 MOIS	1 MOIS
EM3ED1	3 MOIS	1 MOIS
EDX	0	EN TAS A L'EAU DE PLUIE 3 MOIS

Figure 2 - Différents rouissages



A noter que le rouissage en eau de mer précède toujours le rouissage en eau douce.

On lira les références comme suit :

- EM pour **E**au de **M**er suivi de deux chiffres si le temps de trempage est compté en semaines et suivi d'un seul chiffre si le temps de trempage est compté en mois.
- ED pour **E**au **D**ouce suivi de deux chiffres si le temps de trempage est compté en semaines et suivi d'un seul chiffre si le temps de trempage est compté en mois.
- EDX désigne la fibre issue des **demi-noix** de coco récupérée chez les coprahculteurs. Ces demi-noix de coco sont laissées en tas d'environ 3m³, laissé à la pluie, ce qui représente une forme de rouissage.

Pour chacun des rouissages, nous avons fabriqué un échantillon de minimum 20m de cordage de 2 fils toronnés de diamètre 5mm que nous appellerons Toron. Ainsi 13 échantillons de fibre et 13 échantillons de 20m de toron ont été envoyés à l'IFREMER de Brest pour une analyse mécanique avant et après vieillissement accéléré dans l'eau de mer.

Pour rappel, au cours du processus d'extraction de la fibre, VAIHUTI FRESH récupère la tourbe des demi-noix de coco afin de l'utiliser pour la confection de terreau de semis. Une analyse de la tourbe après rouissage en eau de mer a mis en lumière un excès d'iode, excès qui nous a fait retenir un rouissage en eau douce et non en eau de mer car une tourbe chargée en sel ne sera pas bonne pour une utilisation en terreau de semis.

A la lumière de ces informations et de la littérature faisant état d'un rouissage de 4 à 10 semaines pour faciliter la séparation de la fibre de l'épicarpe, nous avons alors réalisé de nouveaux rouissages en eau douce des demi-noix de coco pour des durées de 1 semaine, 2 semaines, 3 semaines, etc. jusqu'à 10 semaines.

À la suite de ce changement de méthode de rouissage, nous constatons après passage dans la défibreuse, qui permet la séparation de la fibre de l'épicarpe, une nette amélioration de cette séparation après 4 semaines de rouissage, un rouissage plus long n'a pas réellement d'impact.

En résumé, nous devons réaliser un rouissage minimum de 4 semaines en eau douce afin de faciliter au mieux la séparation de la fibre, de la tourbe et de l'épicarpe.

En définitive, un rouissage plus long n'est pas nécessaire, les analyses à l'IFREMER de Brest, décrites dans le chapitre suivant, démontrent que le temps de rouissage a un impact non significatif sur la résistance des cordages en fibre de coco en milieu marin.

B. Gestion du taux d'humidité des demi-noix de coco

Une fois la période de rouissage terminée, les demi-noix de coco sont placées à sécher au soleil.



Figure 3 - Noix de coco en séchage

Cette étape permet de gérer le bon taux d'humidité de fibres afin d'optimiser l'étape de défibrage.

Ce taux d'humidité est crucial. En effet, des fibres trop humides génèrent un bourrage dans la défibreuse, bourrage dû à la création d'un agglomérat de fibres courtes et de tourbe. A contrario, si les fibres sont trop sèches, les fibres longues restent reliées à des morceaux d'écorce et de tourbe, les rendant inutilisables pour la fabrication de cordages.

La maîtrise du taux d'humidité ne peut se faire que par une inspection visuelle et au toucher. Il peut d'ailleurs être nécessaire de réhumidifier les fibres à l'eau douce si elles sont devenues trop sèches. La connaissance et la compétence de l'opérateur prennent ici toute leur importance.

C. Passage dans la défibreuse



Figure 4 – Défibreuse



Figure 5 - Chargement de la défibreuse

Une fois le taux d'humidité des demi-noix de coco validé, elles sont placées dans la bouche d'entrée de la défibreuse (Figure 2). Cette machine permet de concasser les demi-noix de coco et de désolidariser les fibres longues, courtes et la tourbe.

La séparation est effectuée par battage des bourres par 3 rangées de lames en acier soudées sur un axe rotatif, propulsé par un moteur électrique de 22 KW.

On obtient alors un premier mélange de tourbe et de fibres courtes qui tombe dans un caisson dédié.



Figure 6 - Fibres longues en sortie de défibreuse

Un deuxième mélange de fibres longues et courtes, de coque et de tourbe résiduelle, est projetée sur le côté (Figures 4 et 5).



Figure 7 - Fibres longues en sortie de défibreuse

L'opérateur met dans le bac prévu à cet effet une à deux demi-noix de coco, les unes à la suite des autres.

La défibreuse peut traiter 500 noix de coco par heure. Le chargement des demi-noix de coco se fait à la main.

D. Passage dans le Tamis

Une fois les fibres et la tourbe désolidarisés, il faut maintenant les séparer.

Le mélange de fibres longues, courtes, de coque et de tourbe résiduelle récupéré à la sortie de la défibreuse est passé dans un tamis rotatif, actionné par un petit moteur électrique.



Figure 8 - Chargement de fibres dans le tamis



Figure 9 – Fibres à l'intérieur du tamis



Figure 10 - Fibres en sortie de tamis

La rotation du tamis permet, grâce à la gravité, de ne conserver dans le tamis que les fibres longues, la tourbe et les fibres courtes tombant dans un bac prévu à cet effet. On obtient donc en sortie un amas de fibres de coco longues, nettoyées des morceaux de coques, tourbe et fibres courtes (Figure 8).

Il reste cependant, mélangés aux fibres, des morceaux d'épicarpe, l'enveloppe extérieure de la noix de coco. Le fait qu'il reste, accroché dans les fibres longues, de l'épicarpe, est un frein à la fabrication de cordage propre et régulier. Il sera donc nécessaire d'effectuer un « nettoyage » manuel des fibres comme nous le verrons plus bas.

E. Séchage de la fibre

Une fois sorties du tamis, les fibres sont étalées et mises à sécher pendant 2 h au soleil.



Figure 11 - Fibres en séchage

En effet, afin de trier la fibre facilement, et surtout de la toronner correctement, il est important que les fibres soient sèches. La difficulté ici réside dans la non-maitrise de la météo. Il sera moins aisé de fabriquer du cordage durant la saison des pluies.

F. Tri de la fibre

La présence d'épicarpe dans la fibre perturbe l'homogénéité du cordage lors du toronnage. Il est également source de rupture.

Il est donc nécessaire, pour obtenir un cordage propre et homogène, de procéder à un retrait manuel des plus gros morceaux d'épicarpe.



Figure 12 - Tri manuel des fibres pour en retirer l'épicarpe

Cette étape est chronophage, 1 personne pouvant traiter l'équivalent de 100 noix de coco en 5 heures.

Il est toutefois possible de fabriquer du cordage sans cette étape, cependant le cordage sera de moins bonne qualité.

G. Passage au peigne

Une fois la fibre nettoyée de l'épicerpe résiduel, elle est placée dans une machine qui la « peigne ». Cette étape permet de l'aérer, d'en défaire les agglomérats et de rendre les fibres plus ou moins indépendantes pour qu'elles puissent s'aligner correctement dans la toronneuse.



Figure 13 - Chargement des fibres dans le peigne



Figure 14 - Peigne

Ici encore, le chargement de la fibre est manuel.

La fibre est étalée sur le plateau puis poussée à la main ou à l'aide d'un bâton.

H. Passage dans la toronneuse

La fibre, maintenant propre et aérée, est ensuite insérée dans la toronneuse via le baquet prévu à cet effet.

Cette dernière étape nécessite un suivi attentionné de la part de l'opérateur.

Le chargeur peut être rempli entièrement ou pas suivant la quantité de cordage à produire.

Sous le chargeur, deux rouleaux permettent d'entraîner les fibres vers un premier peigne.

Cela permet une aération des fibres qui tombent dans un bac.

Un deuxième peigne fait descendre les fibres sur un tapis. Elles passent sous deux rouleaux et un troisième peigne les fait tomber dans un réceptacle en forme de V permettant de les placer le long du guide.

Le guide est un petit fil en lin qui « avance » et tourne sur lui-même, entraînant et agglomérant les fibres pour former un fil.

Pour lancer l'opération il faut raccorder le fil de lin avec un bout de cordage et soupoudrer de fibres. Cela crée le premier agglomérat qui « entrainera » ensuite les fibres amenées dans le réceptacle en V.



Figure 15 - Toronneuse

Les fils sont ensuite rapprochés 2 par 2 pour être toronnés. Cette opération est réalisée par une bobine, qui, tournant sur elle-même, « entortille » les deux fils l'un avec l'autre pour ainsi les toronner.

En résulte une bobine de fil toronné de 2 brins, de 5mm de diamètre environ, et de 200 mètres de longueur maximum.



Figure 16 - Fils et torons

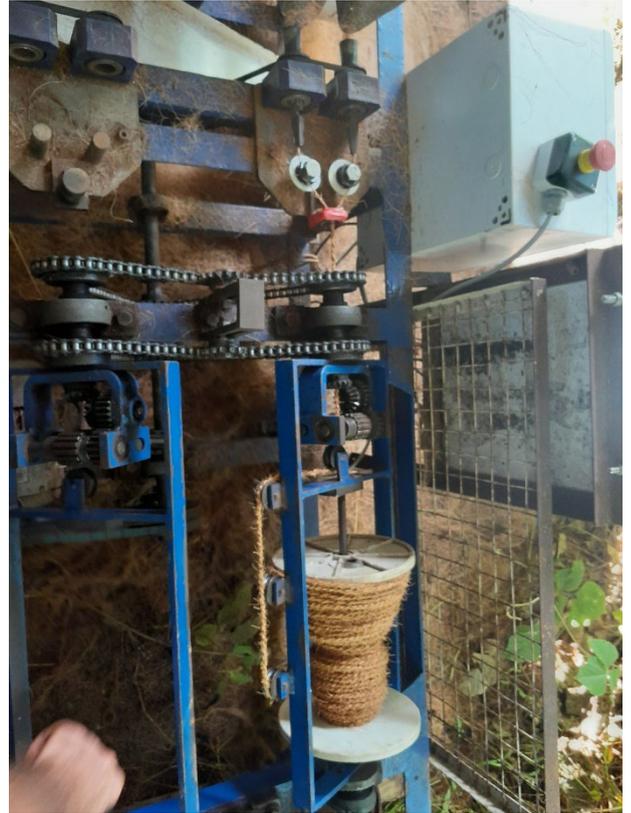


Figure 17 - Torons et bobinage



Figure 19 – Bobinage et fil toronné



Figure 18 – Bobines de fils toronnés et bobine de guide (fil de lin à droite)

I. Tressage

Les cordages toronnés de petit diamètre sont adaptés à des usages ne nécessitant pas une résistance très élevée. De plus, ils ne sont pas résistants en milieu marin. Afin d'augmenter le diamètre, et donc la résistance du cordage, nous allons combiner plusieurs de ces cordages, par une méthode de tressage.

Nous allons pour cela utiliser une tresseuse. Cette machine nécessite de placer les fils à tresser sur des bobines adaptées. On utilise pour cela une autre machine appelée bobineuse, qui enroule le fil de la bonne façon sur ces fameuses bobines (Figures 18 et 19).



Figure 20 - Bobineuse



Figure 21 - Bobines prêtes à être tressés

Ces bobines sont chargées dans une tresseuse de capacité 16 fuseaux. Une telle tresseuse permet de fabriquer des cordages tressés de 4, 8 ou 16 fuseaux.

On peut observer sur la Figure 22 un cordage d'un diamètre d'environ 20 mm.



Figure 22 - Tresseuse



Figure 23 – Cordage tressé

Ces cordages sont ensuite conditionnés en bobines, à la main ou grâce à des bobineuses adaptées.

Pour récapituler, les différentes étapes de la méthodologie pour la fabrication de cordages en fibre de coco résistants en milieu marin sont :

- a. Débarrasser le coco et stocker les morceaux de bourre obtenus en tas soumis aux intempéries (effectué par les coprahculteurs)
- b. Collecter les morceaux de bourre de coco des coprahculteurs et les tremper 4 semaines dans l'eau douce
- c. Faire sécher les morceaux de bourre environ 2 semaines afin qu'ils aient un taux d'humidité propice au passage dans la défibreuse
- d. Passer les morceaux de bourre de coco dans la défibreuse, la fiche technique de cette machine se trouve en annexe 3



- e. Passer le mélange de fibres longues et courtes, de résidu de tourbe et de morceau d'épicarpe dans le tamis, annexe 4
- f. Faire sécher le mélange de fibres longues et de morceaux d'épicarpe obtenu deux heures au soleil
- g. Trier manuellement ce mélange afin d'enlever les plus gros morceaux d'épicarpe et repasser dans le tamis
- h. Passer les fibres longues au peigne puis dans la toronneuse, annexe 5
- i. Stocker les torons obtenus dans des bobines dédiées à la tresseuse, annexe 6
- j. Insérer ces bobines dans la tresseuse pour obtenir un cordage tressé, annexe 7

3) Les cordages en fibre de coco

La dénomination générique du produit commercialisable est un cordage naturel en fibre de noix de coco. Cependant, il est important de détailler plusieurs points concernant ces produits. Ces points sont traités ci-dessous.

A. Intérêt

Contrairement aux cordages les plus répandus, constitués de matière plastique, donc issus de la pétrochimie, polluants et mettant plusieurs centaines d'années à se dégrader totalement, le cordage en fibre de coco est naturel et biodégradable. Ceci permet de diminuer drastiquement, voire d'éliminer purement et simplement les pollutions des sols et des océans dans les zones et les activités pour lesquelles remplacer l'usage du plastique par le coco est possible.

Il est, de plus, facile à produire, particulièrement en Polynésie, où la ressource nécessaire à sa fabrication, la noix de coco, est très présente et déjà exploitée dans le cadre de la culture de coprah.

Lorsque l'on parle de cordages il est important de bien comprendre les différentes techniques de confection et leur intérêt et caractéristiques. Nous allons donner quelques clés de compréhension de ces aspects ci-dessous.

B. Toron / Tresse

Toron :

Assemblage de plusieurs fils de base tournés ensemble, qui forment une corde ou un câble.



Figure 24 – Toron

Tresse :

Une tresse est un assemblage de paquets de fibres (au moins trois) selon un schéma répétitif. Les différentes mèches de fibres passent alternativement au-dessus ou au-dessous des autres. Le croisement des mèches se fait à angle droit (ou presque), et offre un schéma de damier oblique.



Figure 25 – Tresse

Grâce aux deux machines de production de cordage (toronneuse et tresseuse), il est possible de produire des fils toronnés de petits diamètres qui peuvent être commercialisés tels quels, ou servir de fil de base à la confection de tresses de diamètres supérieurs.

Chaque cordage, toronné et tressé, présente des avantages et des caractéristiques techniques qui lui sont propres, notamment en résistance à la rupture et au vieillissement. Un cordage toronné à l'avantage d'être facile à réaliser, la machine nécessaire étant simple et peu coûteuse. A contrario, un cordage tressé est plus complexe et nécessite une machinerie plus onéreuse. Cependant, les différents brins d'un cordage toronné ne sont pas aussi solidaires les uns des autres que ceux d'un cordage tressé. Il est plus facile de « détoronné » un cordage que le « détressé ». Enfin, pour un même diamètre, un cordage tressé aura une charge de rupture plus élevée qu'un cordage toronné.

L'IREMER de Brest a mis en évidence que l'eau de mer favorise grandement le glissement des fibres de coco en elles. La méthode du tressage est donc bien plus performante pour la résistance en milieu marin que la méthode du toronnage, les fibres étant mieux tenues en elles.



C. Propriétés mécaniques des cordages produits

Chaque cordage est caractérisé par plusieurs paramètres :

- Son type : toronné ou tressé
- Son nombre de brin ou fuseaux
- Son diamètre
- Sa charge de rupture

La tresseuse acquise, permet de tresser de 4 à 16 fils de base ce qui donnera des cordages de 4 à 16 fuseaux.

Le fil de base ici est le toron, cordage de 2 fils toronnés, ou 2 brins, fabriqué à l'aide d'une machine.

Le toron confectionné en fibre de coco a de nombreuses aspérités et un diamètre conséquent pour servir de fil de base, qui nous empêchent aujourd'hui d'utiliser toutes les configurations possibles de la tresseuse.

À la suite des nombreux essais et réglages sur la tresseuse, nous avons réalisé différentes tresses. Nous les avons testées sur banc de traction, le tableau ci-dessous recense les différents cordages réalisés en précisant leur diamètre et leur charge de rupture

REF	DESIGNATION	DIAM EN	
		MM	CR EN KG
TORON	TORON DE 2 FILS EN FIBRE DE COCO	5	20
TC4	TRESSAGE COURT DE 4 TORON	10	80
TC4+1	TRESSAGE COURT DE 4 TORON + 1 TORON EN AME	12	100
TC6	TRESSAGE COURT DE 6 TORON	14	120
TL6	TRESSAGE LONG DE 6 TORON	14	120
TC6+1	TRESSAGE COURT DE 6 TORON + 1 TORON EN AME	16	150
TL6+1	TRESSAGE LONG DE 6 TORON + 1 TORON EN AME	16	150
TC8+1	TRESSAGE LONG DE 8 TORON + 1 TORON EN AME	20	200

Figure 26 - Tressages possibles - charges de ruptures (CR) - diamètres

On lira les références comme suit :

- TORON pour toron, cordage fabriqué par la machine toronneuse importé d'Inde
- TC pour un cordage fabriqué par la tresseuse de la Corderie H. LANCELIN ayant un tressage serré, court
- TL pour un cordage fabriqué par la tresseuse de la Corderie H. LANCELIN ayant un tressage long
- Le chiffre désigne le nombre de fuseaux, c-à-d le nombre de bobines de torons chargé dans la tresseuse
- +1 indique que la tresse a été réalisée autour d'une âme de 1 toron.

Afin de tracer avec précision les différents cordages produits, nous avons conçu des fiches techniques dont les modèles sont présentés en annexe 1 et 2.

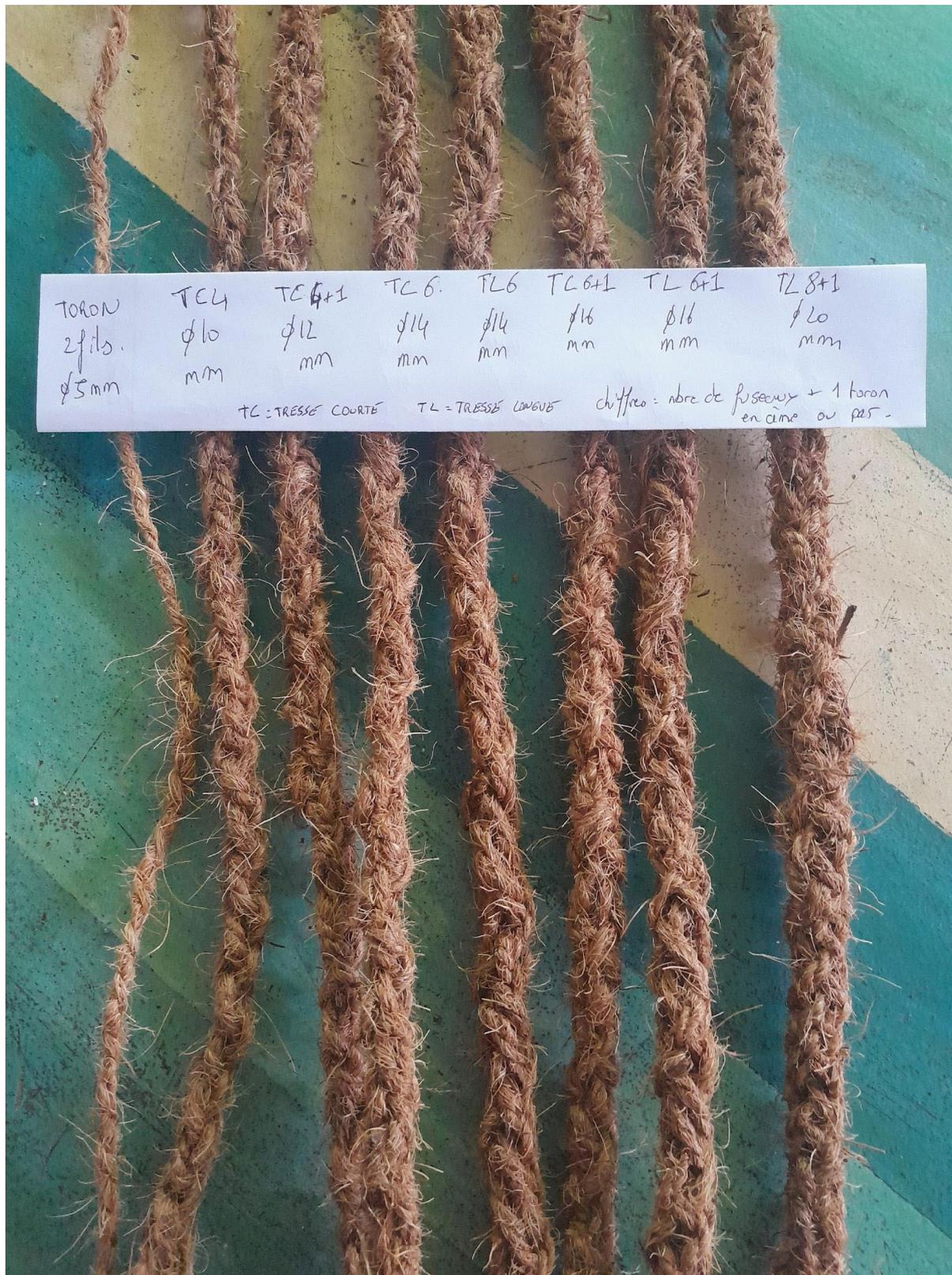


Figure 27 - Différents cordages fabriqués au cours du projet

4) Propriétés mécaniques des cordages en fibres de coco détaillées

Le premier livrable du projet consistait en un état des lieux du savoir-faire traditionnel polynésien. Nous en avons profité pour nous procurer des échantillons de cordages en fibre de coco commercialisés dans le monde.

Nous en avons identifié 3 types principaux :

- Les cordages toronnés fabriqués à partir de machines dédiées, en Inde du sud essentiellement.
- Les cordages toronnés fabriqués à la main et à l'aide d'outils en bois
- Les cordages tressés fabriqués à la main, appelés en Polynésie française, Nape ou Aha.

Des échantillons de ces cordages ont été fournis à l'IFREMER de Brest qui a choisi 4 modèles, de diamètre équivalent, pour les étudier, le but étant de comprendre le comportement mécanique des fibres de coco et de comparer plusieurs tresses et toronnages afin d'optimiser leur fabrication pour un usage sous-marin.

	[coco-m]	[coco-t]	[coco-i]	[coco-r]
Provenance	Îles Marquises	Île Tubuai	Inde	Raiatea
Construction	Tressé main	Tressé main	Toronnée machine	Toronnée machine
Durée rouissage	1 semaine	7 semaines	0 semaine	variable
Masse linéique (g/m)	6.03	5.79	8.25	6.50
Longueur fournie [m]	≈ 30m	≈ 15m	50m	variable

Figure 28 - Cordages pour l'Ifremer de Brest

Les références données dans ce tableau sont utilisées tout au long de ce chapitre.

Coco-m et coco-t correspondent à des cordages tressés manuellement, respectivement par des artisans d'Hiva Oa aux Marquises et un artisan de Tubuaï aux Australes, tandis que les cordages coco-i et coco-r ont été toronnés à l'aide de machines, respectivement en Inde du Sud et acheté sur le site marchand Amazon, ainsi qu'à Raiatea dans les locaux de la ferme bio Vaihuti Fresh.

A. Observations MEB

La surface de chaque fibre a été observée au Microscope Electronique à Balayage (MEB) afin d'évaluer si la provenance de la noix de coco avait une influence sur la topologie de la fibre. Figure 29 présente les topologies observées.

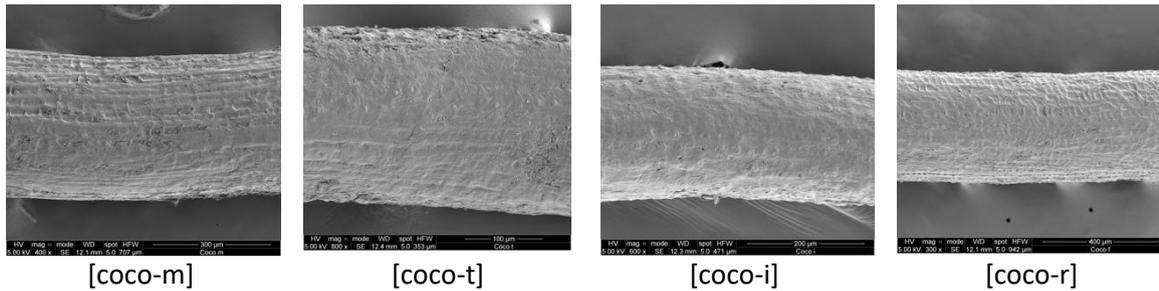


Figure 29 - Observations MEB de la surface des différents échantillons

Aucune différence significative n'a été observée malgré la dispersion géographique des échantillons étudiés. Sur toutes les fibres, des pores présentant des tyloses ont été observés. Un exemple de tylose logée dans un pore est présenté Figure 30. Leur raison d'être est de bloquer les échanges entre la fibre et son environnement en situation de stress ou en cas de présence d'un agent pathogène.

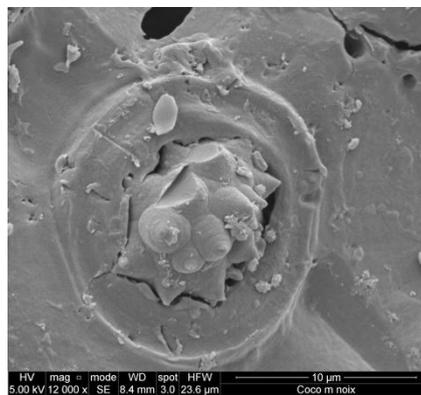


Figure 30 - tylose bouchant un pore de la fibre de coco

B. Essais à l'échelle de la fibre

La fibre de coco seule a d'abord été étudiée afin d'évaluer ses propriétés intrinsèques et de les comparer à celle d'un monofilament en polyéthylène haute densité (PE-HD) de diamètre 0.27 mm. Chaque fibre a été mesurée, pesée, et testée en traction uniaxiale. Pour chaque matériau, 5 fibres ont été testées sur une machine de traction Instron 10 kN équipée d'une cellule de force de 50 N. Les échantillons ont été placés dans des mors pneumatiques Instron dédiés aux essais sur fibres avec une pression dans les mors de 3 bars. La déformation a été mesurée par le suivi de deux marqueurs placés sur les échantillons avant chaque essai. Une vitesse de sollicitation de 50 mm/min a été imposée pour les deux types de fibres. La taille des échantillons de PE-HD était d'environ 30 cm, tandis qu'elle était variable pour les fibres de coco. Les fibres de coco testées sont issues du cordage référencé [coco-r]. Chaque fibre de coco étant différente, les résultats sont normalisés par leur masse linéique respective. La Figure 31 présente les courbes issues des essais et la Figure 32 donne les propriétés à rupture ainsi que les modules calculés entre 0% et 5% de déformation.

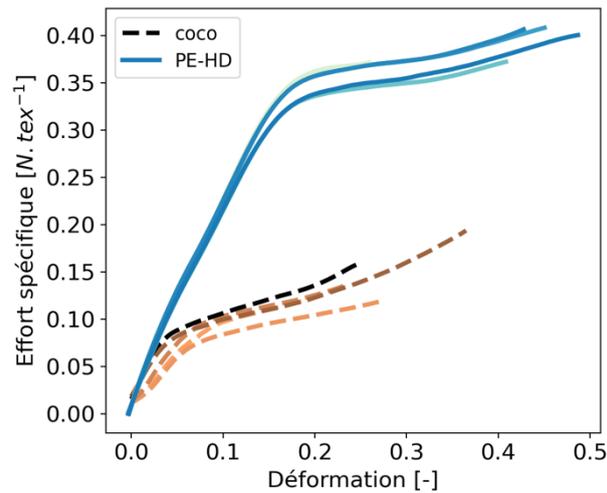


Figure 31 - courbes de traction pour les fibres de coco et un monofilament de PE-HD

	coco	PE-HD	Différence
F_{max} [N.tex⁻¹]	0.15	0.39	-62%
Def_{max} [-]	0.26	0.41	-37%
Module [N.tex⁻¹]	1.16	2.4	-52%

Figure 32 - Synthèse des résultats des essais sur fibre seule.

Pour les fibres de coco, les valeurs de résistance et de déformation sont similaires aux résultats retrouvés dans la littérature (Kulkarni et al. 1981). Le faciès de rupture des fibres a également été observé au microscope électronique à balayage et est présenté en Figure 33. Une surface plane, caractéristique d'une rupture en traction, est alors observée. Les fibres élémentaires composant la structure interne de la fibre de coco sont alors visibles. Les fibres de coco sont généralement composées d'un nombre de cellules allant de 30 à 300 dans la section (Satyanarayana, Kulkarni, and Rohatgi 1981). La rupture en traction conduit à la rupture de la paroi des cellules et de la rupture des microfibrilles repérables à leur forme hélicoïdale. Ce mode de rupture est commun aux fibres naturelles.

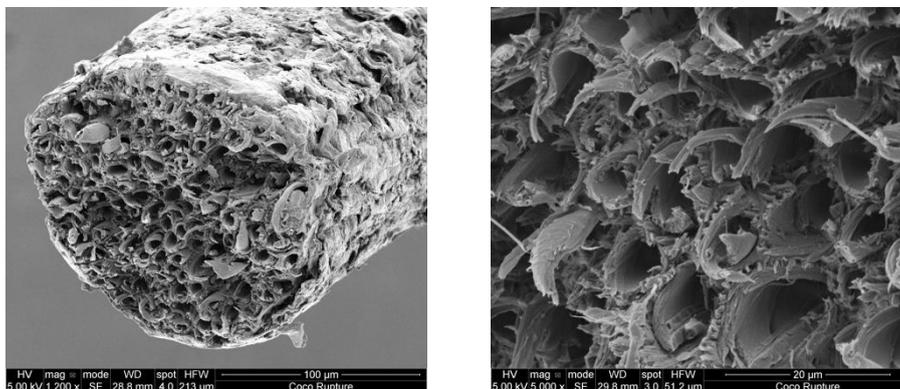


Figure 33 - faciès de rupture d'une fibre de coco sollicitée en traction.

Sans surprise, les propriétés mécaniques des fibres de coco sont bien inférieures à celles du PE-HD. Leur utilisation pour la confection de cordages doit alors être la plus optimisée possible afin de ne pas amplifier cette différence lors du passage à l'échelle du cordage.

C. Distribution des longueurs de fibres dans les différents cordages

La tension au sein d'un cordage doit être répartie sur sa longueur afin de tenir une charge. Les fibres constituant un cordage synthétique sont continues de bout en bout, permettant une bonne répartition de la tension. La longueur des fibres de coco se limite à la taille des noix de coco dont elles proviennent (entre 10 et 40 cm). Le cordage en noix de coco tient alors mécaniquement grâce à l'intrication des fibres entre elles. La manière dont un cordage est confectionné impacte alors fortement ses propriétés mécaniques. Le rôle de la longueur des fibres est également important : plus une fibre sera longue, plus elle pourra se nouer autour des autres, et ainsi répartir au mieux la tension. La distribution de longueur de fibres dans chacun des cordages a été analysée, afin de mettre en relation la méthode d'obtention du cordage, la longueur des fibres, et ses propriétés mécaniques.

Afin d'analyser la distribution de longueur au sein de chaque cordage, le protocole suivant a été suivi :

- Découpe d'un échantillon de 50 cm de cordage,
- Dé-tressage de l'échantillon,
- Mesure de la longueur de chaque fibre.

Un algorithme a été développé afin de mesurer un grand nombre d'échantillons rapidement grâce à un scanner. Chaque fibre est détectée, la ligne centrale est ensuite mesurée. Il est également possible d'avoir une idée de la distribution des diamètres en divisant la surface de la fibre dans sa longueur par la longueur calculée. La Figure 34 présente la distribution des longueurs et des diamètres au sein de chaque cordage étudié, avec chaque point correspondant à la mesure sur une fibre. La Figure 35 présente les longueurs et diamètres moyens issus de ces mesures.

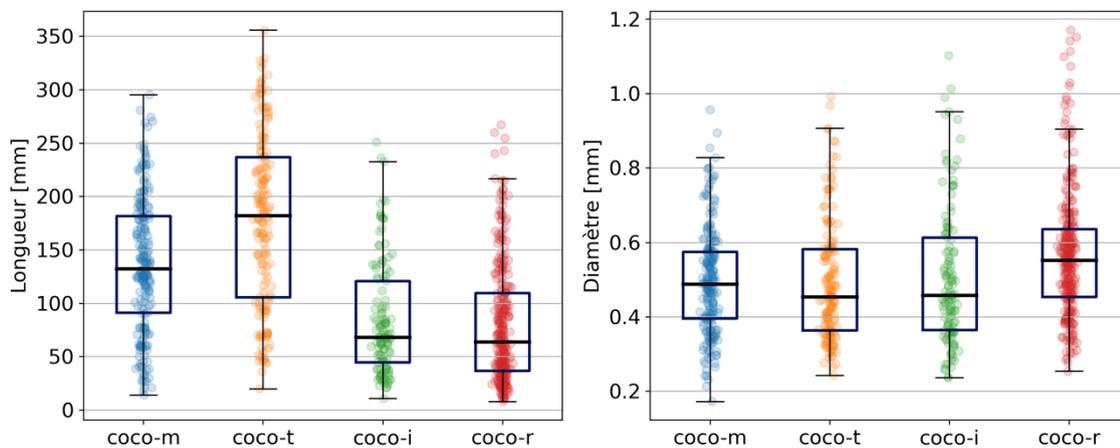


Figure 34 - distribution des longueurs et des diamètres de fibre dans les différents cordages.

	Longueur moyenne [mm]	Diamètre moyen [mm]
[coco-m]	137	0.5
[coco-t]	178	0.5
[coco-i]	84	0.5
[coco-r]	80	0.6

Figure 35 - Longueurs et diamètres moyens des cordages étudiés.



Les longueurs mesurées vont de 10 mm à 350mm, des valeurs typiques pour la longueur des fibres de noix de coco (Kulkarni et al. 1981; Lekha 2004). Les cordages provenant des îles Marquises et de l'Île de Tubuai présentent en moyenne des fibres plus longues que les cordages provenant de Tahiti et d'Inde, avec des fibres pouvant dépasser les 40 cm. Ces résultats s'expliquent par la différence de fabrication des cordages, les cordages [coco-m] et [coco-t] étant réalisés à la main, une sélection s'effectue pour utiliser les fibres les plus longues qui facilitent le procédé de filage. Les cordages [coco-i] et [coco-r] sont quant à eux réalisés via une machine qui ne différencie pas les fibres courtes des fibres longues, entraînant une proportion plus importante de fibres courtes. **Les fibres de coco sont fragiles et sont facilement abîmées, par exemple par les morceaux de coque projetés par la défibreuse. Une solution possible serait que les coprahculteurs débourent les cocos avant de les ouvrir en deux pour en retirer la chair. Cela ajoute de la valeur ajoutée à leur travail et donc participe à augmenter leurs revenus (on paierait plus cher un amas de bourre de coco plutôt que des demi noix de coco).**

De plus, les cordages [coco-m] et [coco-t] ont été réalisés à partir de noix de coco de grandes tailles cultivées spécialement pour leurs fibres alors que les noix de coco utilisées pour le cordage [coco-r] sont quant à elles des coproduits de la culture du coprah, où la taille de la noix de coco n'est pas un facteur discriminant.

Les diamètres mesurés sont compris entre 0.2 mm et 1.2 mm, dispersion encore une fois proche des valeurs de la littérature (Rajan and Abraham 2007). Aucune différence significative n'a alors été observée entre les différents cordages. Les résultats sur le diamètre sont cependant à prendre avec du recul, en effet la précision du scanner ne permettait pas de décrire précisément la section longitudinale des fibres les plus petites, qui doivent alors être sous représentées ici.

D. Essais mécaniques à l'échelle du cordage

À la suite des premières analyses décrites plus haut, les cordages ont été testés mécaniquement afin d'étudier le rôle de la longueur des fibres sur leur tenue mécanique en traction.

Cinq échantillons de 30 cm de chaque cordage ont été prélevés puis sollicités en traction. Le même montage que pour les fibres a été utilisé, avec une pression dans les mors similaires. Un déplacement de 50 mm/min a été imposé, entraînant un effort mesuré grâce à une cellule de force de 500 N. La déformation des cordages a été mesurée par corrélation d'images grâce au suivi de marqueurs par une caméra lors des essais.

La Figure 36 montre un échantillon du cordage [coco-m] avant (a) et après (b) essai suivant le protocole décrit. Les cordages [coco-r] ont été placés sur la machine avec un des mors à rouleaux, leurs diamètres étant trop élevées pour les mors pneumatiques, nécessitant 1 mètre de cordage pour 30 cm de longueur utile. La Figure 36 (c) montre le montage utilisé pour ces cordages.

La Figure 37 présente des exemples de courbes obtenues pour les différents cordages, l'effort est normalisé par la masse linéique de chaque cordage. La Figure 38 résume les résultats obtenus pour les différents cordages.

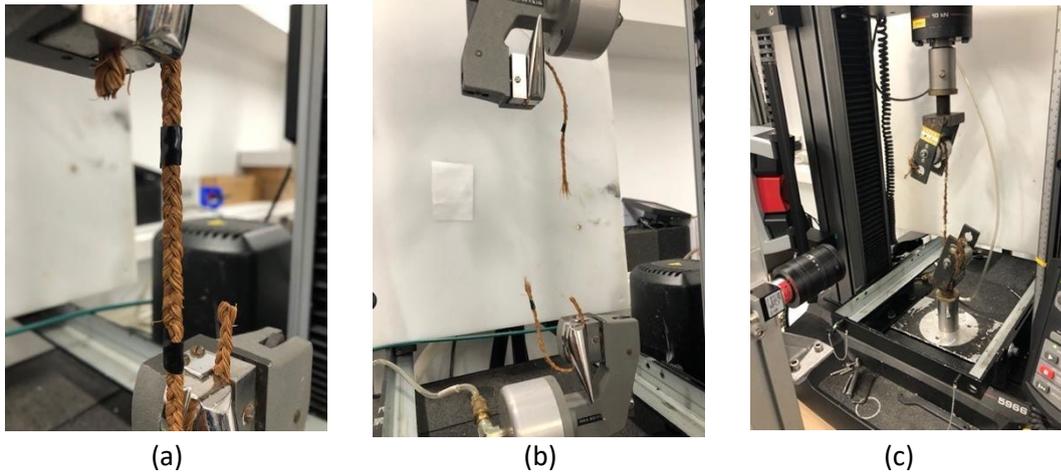


Figure 36 - échantillon du cordage [coco-m] (a) avant et (b) après avoir été testé mécaniquement, (c) échantillons du cordage [coco-r] placé sur le montage avec des rouleaux.

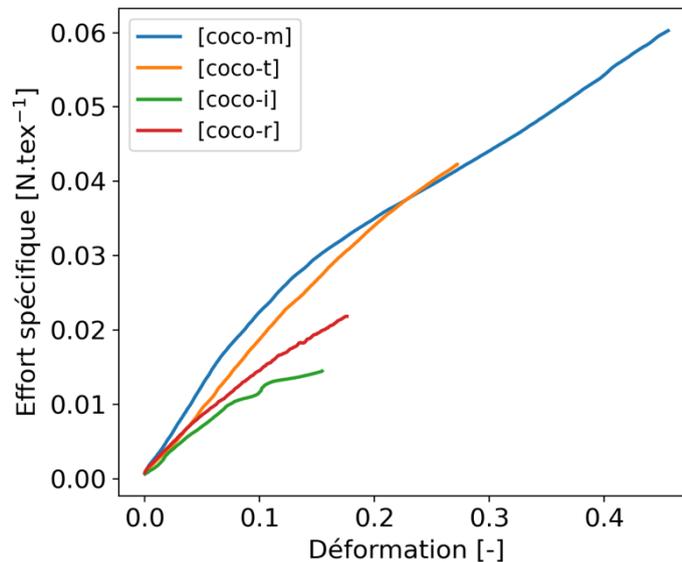


Figure 37 - exemple de courbes de traction pour chaque cordage.

Référence	[coco-m]	[coco-t]	[coco-i] (toron)	[coco-r]
Déformation à rupture moyenne [-]	0.48	0.29	0.19	0.18
Effort à rupture moyen [N]	326.17	240	168	153
Tex [g.km ⁻¹]	6.03e3	5.79e3	8.25e3	6.50e3
Module [kN]	1.1	1.0	1.2	0.93
Effort spécifique à rupture moyen [N/tex]	0.054	0.041	0.020	0.023
Module spécifique [N/tex]	0.19	0.18	0.14	0.14

Figure 38 - Synthèse des résultats pour les différents cordages testés en traction.

Les résultats obtenus sur le cordage [coco-m] démontrent l'importance de l'étape de tressage pour la tenue mécanique. Tout d'abord car le passage de l'échelle fibre à l'échelle cordage divise par trois la performance des fibres de coco. Cette perte peut s'expliquer par la discontinuité des fibres dans le cordage, et creuse encore plus l'écart avec les fibres synthétiques. Ensuite car le cordage [coco-m]

et le cordage [coco-t], réalisés à la main, et avec des fibres plus longues, présentent des propriétés mécaniques bien supérieures aux cordages produits par des machines. **Le fait que le cordage [coco-m] soit plus résistant que le [coco-t] s'explique par le soin apporté lors de son tressage. En effet le cordage [coco-m] est réalisé pour l'artisanat d'art, ce qui demande une tresse régulière et sans défaut, entraînant alors des propriétés mécaniques supérieures à celui du cordage [coco-t] qui possède pourtant des fibres plus longues. Avoir des fibres plus courtes n'est donc pas un frein à l'obtention de bonnes propriétés mécaniques, mais un soin particulier doit être apporté lors de l'étape de tressage pour assurer une bonne répartition de la tension entre les fibres, quelle que soit leur taille.**

E. Absorption d'eau par les fibres de coco

L'application étudiée ici, la culture d'huîtres perlières, implique que les cordages soient immergés en eau. L'absorption d'eau par les fibres de coco a alors été évaluée à l'aide d'une machine imposant des paliers d'humidité (DVS, Differential Vapour Sorption), tout en mesurant la prise de masse de l'échantillon comme illustré en Figure 39(a). À partir des paliers il est alors possible de déterminer l'absorption d'eau du matériau en fonction de l'humidité relative, c'est ce qui est représenté pour une fibre de [coco-m] avec la Figure 39(b). L'essai a été réalisé à 25°C, température proche de celle vue par les cordages en mer.

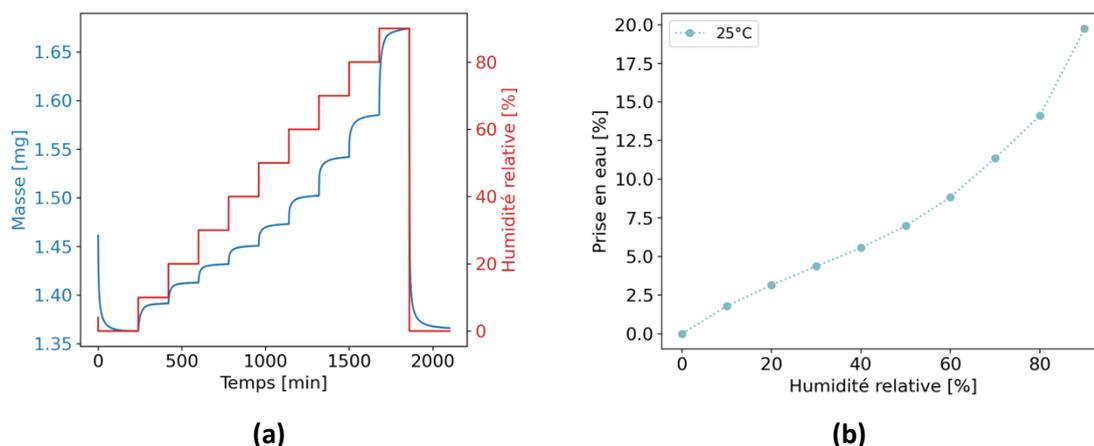


Figure 39 - (a) paliers d'humidité imposés et prise de masse, (b) courbe d'absorption d'eau correspondante

Pour une humidité relative de 90%, l'absorption d'eau de la fibre à 25°C a atteint 20%. Dans la littérature, les valeurs trouvées pour une immersion dans l'eau sont bien supérieures et peuvent atteindre les 140% (Narendar and Priya Dasan 2014). **Les fibres de coco absorbent donc énormément d'eau**, l'impact de cette absorption d'eau sur les propriétés mécaniques a alors été étudié.

F. Impact de la saturation en eau sur les propriétés du cordage

Pour étudier l'impact de l'eau sur les propriétés mécaniques des cordages, chaque cordage a été immergé pendant 6 heures dans de l'eau douce, puis retiré pour être testé directement. Le protocole est ensuite le même que pour les cordages à l'état sec. La Figure 40 présente une synthèse des résultats pour des essais sur cordages secs et mouillés.

	coco-m		coco-t		coco-i	
	50% RH ¹	100% RH ¹	50% RH ¹	100% RH ¹	50% RH ¹	100% RH ¹
Fmax¹ [N]	326	323 (-1%)	239	212 (-11%)	176	81 (-52%)
Module¹ [N]	1159	735 (-37%)	1046	627 (-40%)	1164	513 (-56%)
Defmax¹ [-]	0.48	0.49 (+3%)	0.29	0.41 (+40%)	0.19	0.16 (-17%)

Figure 40 - Synthèse des résultats pour les essais sur cordages secs et mouillés.

Les trois cordages sont impactés par l'absorption d'eau, mais pas tous de la même manière. Le cordage [coco-m] présente une baisse de module¹ mais pas de baisse significative d'effort et de déformation à rupture. Le cordage [coco-t] subit une perte équivalente de module, mais une augmentation importante de la déformation à rupture. Enfin le cordage [coco-i] perd plus de raideur que les autres cordages, mais perd surtout plus de la moitié de sa résistance en traction. La Figure 41 présente les courbes de traction pour le cordage [coco-m] et le cordage [coco-i] permettant de mieux comprendre la perte de propriétés du cordage indien.

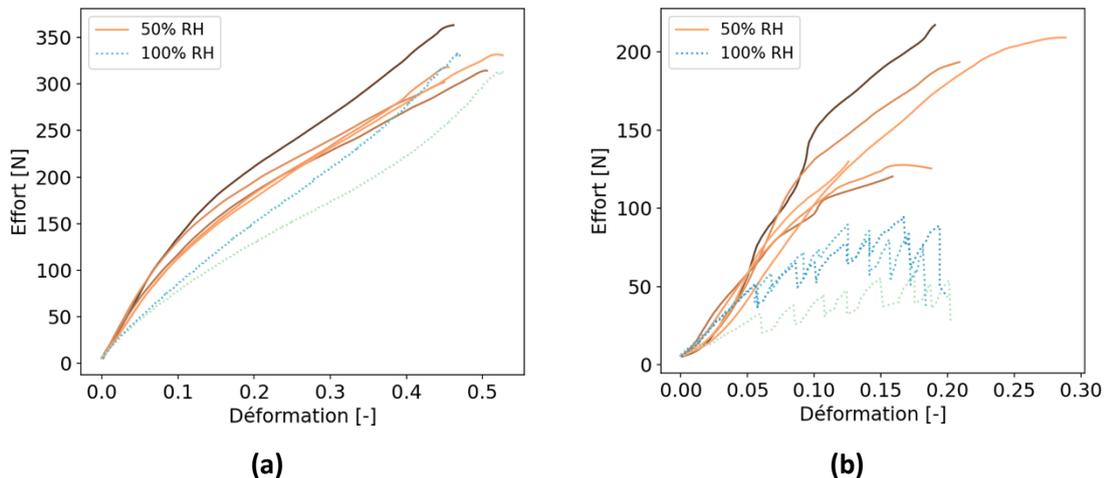


Figure 41 - courbes de traction à l'état sec et mouillé pour le (a) le cordage [coco-m], (b) le cordage [coco-i].

Le cordage [coco-m] présente un comportement linéaire avec une perte de raideur, mais atteint les propriétés à rupture obtenues à l'état sec. Une fois mouillé le cordage [coco-i] perd en raideur, mais présente également un comportement fortement non-linéaire avec des chutes de tensions récurrentes. **Ces chutes de tension sont liées à des glissements des fibres entre elles lors de l'essai, conduisant au dé-tressage progressif du cordage à un niveau de charge deux fois moins important qu'à l'état sec. Ces résultats viennent appuyer ceux obtenus à l'état sec en ce qui concerne l'importance du tressage dans les propriétés mécaniques,** le cordage [coco-m] avec un tressage de qualité étant bien plus résistant qu'un cordage réalisé à la machine où peu d'attention est prêtée à la qualité du tressage final.

¹ RH : Humidité Relative (50% avant immersion, 100% après immersion pendant 6h) – Fmax : Force à laquelle a été soumise la fibre jusqu'à rupture – Module : caractéristique d'élasticité d'un matériau – Def : déformation subie par le matériau

G. Impact du rouissage sur les propriétés

La noix de coco possède une structure en couches commune aux fruits schématisée en Figure 42(a). Les fibres de coco se trouvent dans le mésocarpe du fruit, communément appelé la bourre de coco. L'endocarpe est retiré pour récupérer l'albumen qui est séché pour en extraire l'huile. L'exocarpe (ou épicarpe) et le mésocarpe sont ensuite immergés dans les lagons ou les rivières, c'est l'étape dite de rouissage. Le rouissage permet de séparer la partie fibreuse du mésocarpe de sa partie non-fibreuse, visible sur la Figure 42(b). L'action de microorganismes qui s'attaquent aux substances pectiques se trouvant à l'interface entre la fibre et la bourre facilite la séparation des deux composants (Remani, Nirmala, and Nair 1989).

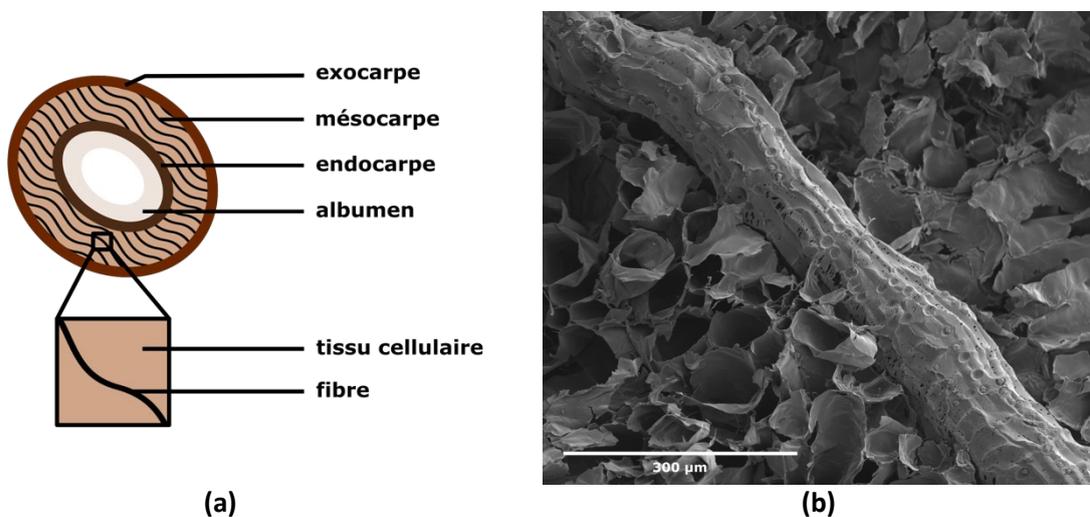


Figure 42 - (a) schéma de la structure d'une noix de coco, (b) observation MEB d'une fibre entourée du tissu cellulaire.

Plus le temps de rouissage est long, plus la fibre se sépare facilement du tissu cellulaire qui l'entoure. Pour d'autres fibres naturelles, comme le lin, la résistance des fibres augmente avec le temps de rouissage (Martin et al. 2013), ce qui n'est pas le cas pour les fibres de coco d'après la littérature (Kulkarni et al. 1981). Différents cordages [coco-r] ont été fabriqués avec des fibres provenant de rouissages avec des immersions en eau de mer et/ou en eau douce sur des temps différents, réalisés en Polynésie Française. Les différents cordages ont ensuite été testés mécaniquement pour étudier l'impact du rouissage sur leurs propriétés. La Figure 43 présente l'effort à rupture ($F_{rupture}$) et la déformation à rupture ($\epsilon_{rupture}$) en fonction de la durée de l'immersion en eau de mer (t_{EM}), et plusieurs temps de rouissage en eau douce (t_{ED}).

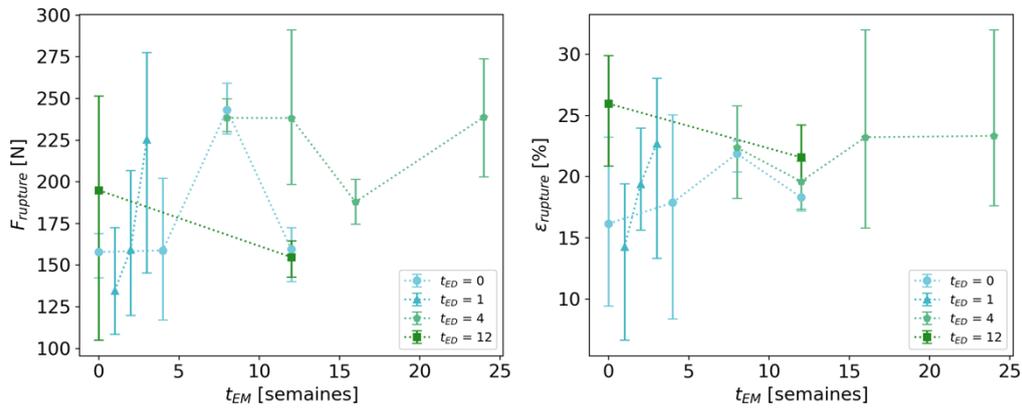


Figure 43 - évolution des propriétés mécaniques du cordage [coco-r] en fonction de la durée de rouissage en eau de mer et en eau douce.

Les données obtenues à la suite des essais présentent une dispersion importante, aucune tendance significative ne permet de tirer de conclusions sur un éventuel impact du rouissage sur les propriétés mécaniques des cordages étudiés. La variation de propriétés potentiellement induites par les différents rouissages peut être faible comparée aux dispersions importantes liées à la fabrication des cordages. Des essais sur fibres seules comme effectués précédemment sont alors à privilégier pour étudier plus finement le rôle de ce paramètre. Des observations au MEB ont été réalisées en complément afin d'évaluer si le rouissage impactait la surface des fibres. Les observations ont été réalisées sur des fibres à l'état initial, et sur des fibres ayant été rouies 3 mois en eau de mer, 3 mois en eau douce, et 3 mois en eau de mer puis 3 mois en eau douce.

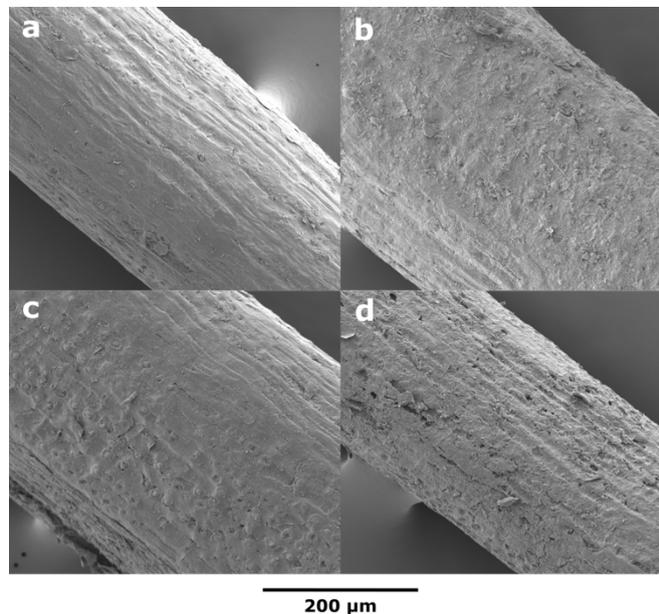


Figure 44 - observation MEB sur des fibres du cordage [coco-r] (a) à l'état initial, (b) rouies 3 mois en eau de mer ($t_{EM} = 3$, $t_{ED} = 0$), (c) rouies 3 mois en eau douce ($t_{EM} = 0$, $t_{ED} = 3$), (d) rouies 3 mois en eau de mer puis 3 mois en eau douce ($t_{EM} = 3$, $t_{ED} = 3$)

Les fibres rouies 3 mois en eau de mer ou 3 mois en eau douce ne présentaient pas de différence avec les fibres observées à l'état initial, mais les fibres observées après 3 mois de rouissage en eau de mer puis 3 mois en douce présentaient de légères traces de dégradation. Des dégradations sont visibles après 3 mois en eau de mer et 3 mois en eau douce, alors qu'aucune érosion n'est observée lorsque ces deux vieillissements sont découplés. Le procédé de dégradation biotique n'est donc pas arrêté par le passage d'un milieu à un autre. Des observations sur des fibres vieillies 6 mois en eau de mer sont cependant à effectuer pour confirmer cette hypothèse. Ces résultats confirment que le rouissage a peu d'impact sur les fibres, et que les changements qui apparaissent sont trop faibles pour être observables à l'échelle d'un cordage présentant une forte dispersion.

H. Vieillessement des cordages

Pour finir, les cordages ont été immergés en eau de mer naturelle sur le long terme pour simuler le vieillissement qu'ils pourraient subir pour l'application visée. Des échantillons de mêmes dimensions que ceux utilisés pour les essais initiaux ont été immergés dans des bacs d'eau mer renouvelée depuis la rade de Brest. Les bacs étaient maintenus à différentes températures : 4°C, 15°C, 25°C, 40°C pour couvrir toute la plage de température du milieu marin, 40°C étant une température extrême. Trois échantillons de chaque cordage ont été retirés de l'eau à différents temps d'immersion : 1, 3, 6, et 10 mois. Après avoir été retirés de l'eau, les cordages ont été séchés dans une étuve à 40°C durant une nuit. Les essais ont ensuite été réalisés dans les mêmes conditions que pour les essais à l'état initial. La Figure 45 présente l'évolution de l'effort à rupture des différents cordages en fonction du temps d'immersion.

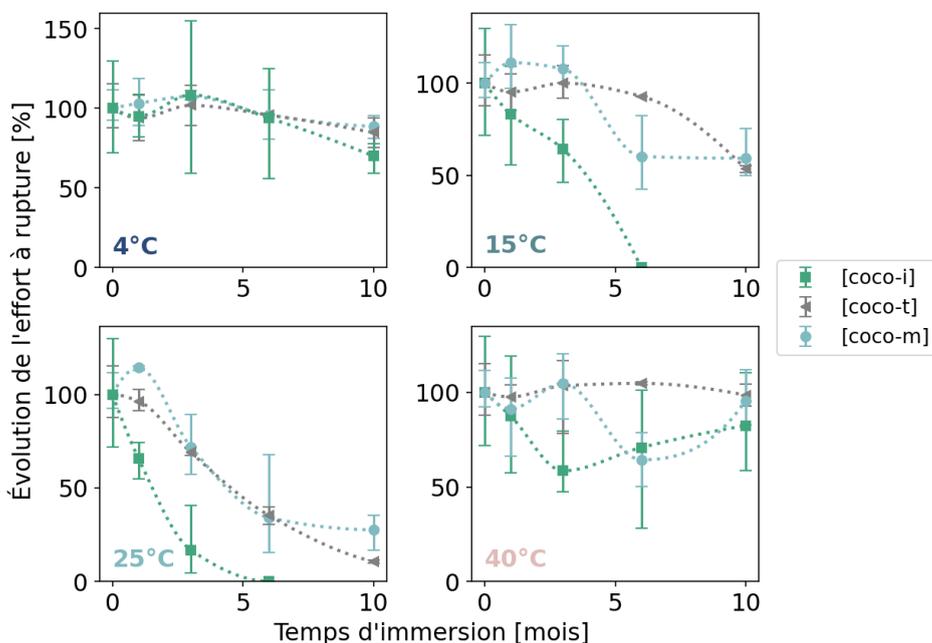


Figure 45 - évolution de l'effort à rupture en fonction du temps d'immersion à plusieurs températures

Aucune perte de propriété n'est observable après 10 mois d'immersion à 4°C, et ce pour tous les cordages. Durant l'immersion à 15°C, tous les cordages perdent en résistance. Le cordage [coco-i] a rapidement perdu ses propriétés mécaniques, devenant inutilisable après 6 mois d'immersion. Après

10 mois d'immersion, les autres cordages ont perdu presque la moitié de leur résistance initiale. À 25°C la perte est plus rapide et plus linéaire qu'à 15°C pour l'ensemble des cordages. Les cordages [coco-i] ne présentaient plus aucune résistance mécanique au bout de 6 mois de vieillissement, tandis que les cordages [coco-m] et [coco-t] ont perdu respectivement 70% et 90% de leur résistance initiale. Après 10 mois d'immersion à 40°C, les différents cordages ne présentaient pas de perte de propriétés significatives. L'hypothèse est que les bactéries marines responsables de la dégradation des fibres aux températures plus faibles ne supportent pas la température extrême de 40°C.

Des observations MEB ont été réalisées sur le cordage [coco-m] après 6 mois d'immersion à 25°C. La Figure 46 présente deux de ces observations.

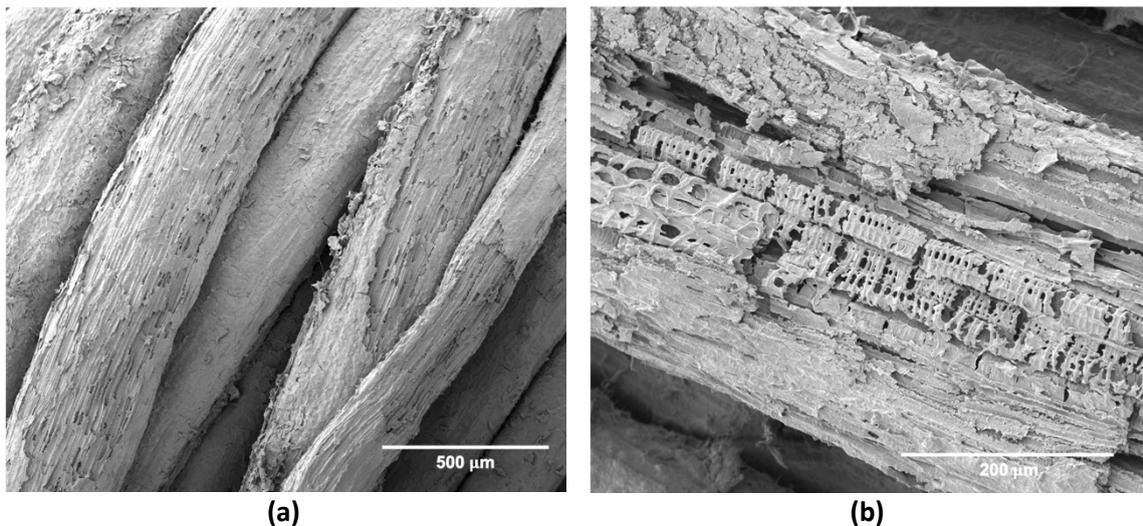


Figure 46 - observations MEB des fibres de [coco-m] après 6 mois de vieillissement à 25°C.

La Figure 46(a) présente une vue d'ensemble des fibres. Certaines fibres ont été dégradées sur leur surface, rendant visible leur structure interne. D'autres fibres ne présentent pas de dégradation. La Figure 46(b) permet de voir le processus de dégradation plus en détail, notamment avec la présence de microfibrilles en cours de dégradation. Une fois les fibres dégradées, le cordage [coco-i] a perdu ses propriétés plus rapidement que les cordages [coco-m] et [coco-t]. **Un cordage avec un meilleur tressage est alors moins sensible à la dégradation des fibres le constituant.**

En comparant les résultats du vieillissement à 25°C avec ceux issus des différents rouissages, une incohérence apparaît. Pour une immersion dans les bacs à 25°C les cordages perdent au moins 50% de leurs propriétés mécaniques, alors qu'après 6 mois de rouissage en eau de mer dans un lagon à une température équivalente, aucune perte n'est observée. Il en est de même pour ce qui est des observations MEB. Les fibres immergées 6 mois en Polynésie présentent certes des dégradations (Figure 18), mais elles restent faibles rapportées à celles observées sur les fibres immergées 6 mois dans les locaux de l'Ifremer de Brest (Figure 46).

La dégradation biotique des fibres de coco est plus rapide avec l'eau pompée de la rade de Brest qu'avec l'eau des lagons polynésiens, les microorganismes présents dans les bacs d'eau de mer de l'Ifremer sont alors plus susceptibles de dégrader ces fibres. Ces essais ne sont donc pas appropriés pour étudier l'application visée en Polynésie Française, mais permettent de comprendre les cinétiques de dégradation de ces cordages pour une utilisation dans des eaux tempérées de l'océan Atlantique. Ces résultats montrent également que les fibres de coco sont une alternative plus saine aux fibres synthétiques en PE-HD qui, d'après des résultats d'une étude précédente (Le Gué et al.



2023), ne présentaient aucun signe de dégradation après plus d'un an dans les mêmes conditions. Le fait que les fibres de coco sont une alternative plus saine aux fibres synthétiques est cependant conditionné à la nature 100% naturelle de la fibre, éliminant alors les fibres de coco importées par conteneurs qui présentent le plus souvent des traces d'insecticides (projet CORD'ÂGE, Ifremer). En effet les fibres transportées par conteneur sont aspergées d'insecticides afin de les protéger durant la durée du transport, étape qui n'est pas nécessaire pour les fibres produites localement comme pour la tresse [coco-r], renforçant la pertinence de produire le cordage localement.

I. Conclusion de l'IFREMER de Brest

Les fibres de coco ont d'abord été testées à l'échelle de la fibre, révélant une résistance 2 fois plus faible que le monofilament de référence en PE-HD. Trempées dans l'eau de mer de Brest à 25°C pendant 6 mois, **les fibres provenant de Raiatea ont subi une forte détérioration ce qui n'est pas le cas quand on les immerge dans le lagon de Raiatea.**

L'étude des différents paramètres de confection des cordages démontrent l'importance de la qualité du tressage pour l'optimisation de leur résistance à l'état sec comme mouillé. Un bon tressage améliore également la durabilité des cordages immergés en eau de mer.

L'étude de vieillissement menée sur les fibres, bien que peu représentative du milieu marin dans lequel nos cordages seront immergés, a permis de démontrer que ces fibres étaient non persistantes dans l'environnement marin, et donc une alternative plus saine aux fibres synthétiques comme le PE-HD.

Enfin, l'étude du rouissage, partie importante du procédé d'obtention des fibres, montre que le temps ou le milieu (eau douce ou salée), n'a aucune influence sur la résistance de la tresse, la modification de la fibre par le rouissage étant trop faible par rapport à l'impact liée à la qualité de fabrication du cordage.

5) Impact environnemental des cordages en fibres de coco

Remplacer les cordages en PE² des fermes perlières par des cordages en fibre de coco, permettrait de diminuer la pollution des lagons tout en faisant réaliser des économies d'énergie. Mais qu'en est-il de l'impact sur les micro-organismes présents dans les eaux polynésiennes et, surtout, quel serait l'impact sur les larves des huîtres perlières ?

Dans le cadre de sa thèse au centre IFREMER du Pacifique à Vairao, Tahiti, Ameline ORTS a réalisé une étude de la toxicité sur le développement larvaire de *Pinctada margaritifera* (huître perlière) et de la dynamique de colonisation de cordages alternatifs au polyéthylène.

A. Matériel et Méthode

Les 3 matériaux alternatifs au polyéthylène analysés dans cette étude sont :

- Cordages à base de fibre de coco venant d'Inde
- Hybride coco/trossard : Le trossard est une fibre Haut Module Polyéthylène (HMPE). Dans ce procédé, l'âme est la même que précédemment et, autour, on a tressé une gaine de trossard non traitée, qui permet d'accroître la résistance de l'hybride mais aussi de contraindre la fibre de coco contenue en son centre pour limiter son gorgement en eau
- Dyneema : tresse de fibre HMPE et ensimée d'un mélange à base de polyuréthane, à chaud pour éviter l'élongation. Ce cordage est considéré comme étant très résistant en particulier à l'eau de mer

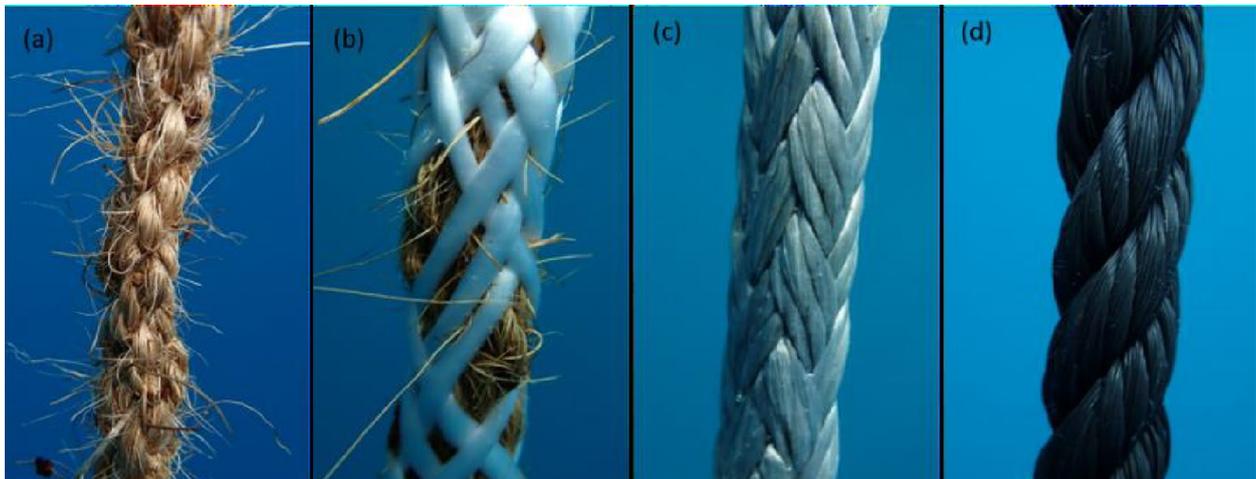


Figure 47 - Photographies macro des cordages de (a) coco, (b) coco/trossard, (c) dyneema et (d) polyéthylène

² PE : Polyéthylène



B. Résultats

Afin de ne pas alourdir le présent rapport, nous laisserons le loisir au lecteur de consulter le rapport rédigé par l'Ifremer présenté en Annexe. Nous ne présenterons ici que l'analyse des chiffres et non les chiffres eux-mêmes.

a. Toxicité

Concernant l'étude de la toxicité des cordages à base de coco, trossard, dyneema et polyéthylène sur le développement larvaire de l'huître perlière *Pinctada margaritifera*, plusieurs observations peuvent être dégagées. Premièrement, le matériau présentant la toxicité la plus élevée est le trossard. Le dyneema quant à lui est légèrement plus toxique que le trossard. Viennent ensuite les cordages en coco puis le polyéthylène.

Ces résultats ne valident pas l'hypothèse de départ selon laquelle les cordages à base de matériau naturel comme la coco seraient moins toxiques que les cordages à base de plastique comme le trossard, le dyneema et le polyéthylène. Cependant, différentes informations disponibles dans la littérature bibliographique permettent de discuter ces résultats.

Une étude réalisée par le Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (1998) a permis de faire une analyse chimique de différents cordages en coco. La fiche technique établie fait le comparatif entre 3 marques de substrat à base de coco à savoir KOKOBREAD et COCOSOL constitués de résidus de fibre de coco ainsi que de la coco brute. En effet, cette étude révèle la présence de chlorures et de sulfates dans les substrats. La concentration en sulfates la plus forte testée à laquelle aucun effet sur l'organisme vivant n'est observé (CSEO) n'excédait pas 0.68 g/L. Au-delà des CSEO déterminées, des malformations durant le développement larvaire des moules comme la formation d'une seule coquille, d'un manteau proéminent, d'une coquille malformée, d'une partie seulement d'une valve, des bords coupés, des tailles inégales et la présence de charnière concave ou convexe ont été observées.

Concernant les chlorures, ces derniers sont issus du chlore, un puissant oxydant qui peut s'avérer être toxique pour les organismes vivants. Ces informations pourraient expliquer les résultats de niveau de toxicité pour les matériaux à base de coco.

b. Biais expérimentaux

La contamination de l'eau utilisée est la principale composante pouvant constituer une source d'erreur quant aux tests de toxicité des 4 matériaux sur le développement larvaire de *Pinctada margaritifera*. De plus l'étude de la composition chimique inconnue et la plupart du temps non identifiable des lixiviats de plastique rend les résultats incertains. Enfin, l'utilisation de blancs ou d'échantillons de contrôle de la qualité pour évaluer la contamination potentielle au cours de l'expérience et la précision des mesures est difficile car leur contamination semble être un phénomène quasi-systématique. La présence de malformations et la mortalité sur les larves dans les 3 réplicas de témoin (traités à l'eau de mer filtrée et autoclavée) pourrait être expliquée par ces observations. **Une contamination pourrait également être issue du matériel utilisé, les cordages en fibre de coco utilisés ayant subi un traitement phytosanitaire avant leur exportation d'Inde.**



Il est également important de préciser que les pourcentages de larves D normalement formées dans les témoins se situent en dessous du seuil fixé au départ pour valider l'expérience de toxicité à savoir 80%. La valeur acceptée au cours de cette expérience (~60%) pourrait être due à une mauvaise qualité de semence délivrée par les géniteurs.

c. Dynamique de colonisation

Concernant l'étude de la masse de matière organique fixée au cours du temps sur les cordages à base de coco, trossard, dyneema et polyéthylène, aucune différence statistiquement significative n'a été constatée entre les différents matériaux. La même observation peut être faite sur l'expérience d'immersion de cordages non lestés pendant 15 semaines et sur celle de cordages lestés immergés pendant 8 semaines.

Néanmoins il est possible d'observer une tendance de la masse de matière organique fixée à être plus élevée sur les matériaux à base de coco. Inversement, les cordages à base de matériaux plus artificiels semblent avoir tendance à accumuler moins de matière que les cordages à base de. L'analyse taxonomique permet de soulever le fait que certains taxons ont tendance à se développer plus sur les cordages à base de coco que sur les cordages de dyneema et polyéthylène.

d. Biais expérimentaux

Il est possible de soulever certains biais expérimentaux ayant pu influencer les résultats ainsi obtenus. Premièrement, il est possible de souligner que la période d'immersion des cordages choisie pour la présente étude était de 15 et 8 semaines. Contrairement aux tests de la littérature sur la dégradation des cordages en polymères en milieu marin qui ont duré 12 mois. Également, l'importance des conditions environnementales du site d'immersion des cordages pourrait être prise en compte en sélectionnant plusieurs sites d'immersion aux conditions environnementales différentes. De plus, l'éventuelle pression d'herbivorie qui pourrait s'exercer sur les cordages n'est pas pris en compte. Pour finir il faut inclure les éventuels biais liés à la manipulation des cordages, notamment lors de leur retrait, qui peuvent induire une perte de matière organique.

C. Conclusions de l'IFREMER de Vairao

La présente étude a permis de faire une analyse de différents paramètres relatifs à la potentielle utilisation de matériaux alternatifs au polyéthylène par les fermes perlières. Les composantes étudiées sont l'effet de leur toxicité sur le développement larvaire de l'huître perlière *Pinctada margaritifera* et leur dynamique de colonisation en termes de fixation et de diversité d'organismes autres. Les résultats de cette étude ainsi que les données disponibles dans la littérature suggèrent que l'utilisation de matériaux alternatifs au polyéthylène dans les fermes perlières est plus complexe qu'il n'y paraît.

Bien que l'impact des microplastiques relargués par les cordages à base de polyéthylène soit considérable dans les atolls perlicoles, l'utilisation de cordages à base de coco et/ou de polyéthylène haut module comme le trossard et le dyneema ne semble pas être une « solution miracle ». Une étude de la dynamique de colonisation des cordages fabriqués en Polynésie

française étendue sur 12 mois avec des sites présentant des conditions environnementales différentes pourrait permettre de valider ou d'infirmer les hypothèses posées au départ de manière plus significative.

Une étude du taux de fixation des naissains et de leur survie sur différents substrats en milieu naturel permettrait d'observer si les processus physiologiques de l'huître perlière *Pinctada margaritifera* peuvent contrer la toxicité des matériaux. Les paramètres ainsi mesurés seraient le taux de fixation et de survie de naissains ayant achevé leur développement larvaire placés sur des substrats à base de matériaux alternatifs au polyéthylène. De plus, il serait intéressant de tester la toxicité de ces matériaux après « vieillissement » dans de l'eau de mer afin d'observer si cette dernière s'atténue au cours du temps.

Le choix de l'utilisation de matériaux alternatifs au polyéthylène par les fermes perlières peut se baser sur différents critères mais ces derniers ne permettent pas de discriminer un seul matériau par rapport aux autres s'ils sont considérés tous ensemble. Il est donc important de définir au préalable selon quels critères on souhaite remplacer l'utilisation du polyéthylène (impact environnemental ; taux de fixation, survie et larve D de l'espèce élevée ; dynamique de colonisation par la faune fixée ; résistance au sens large etc.).



5) Conclusion et perspectives

Longtemps considérée comme un déchet par les coprahculteurs, la bourre de coco peut servir de matière première à la fabrication de cordages locaux à base de fibre de coco en Polynésie française et notamment à une échelle industrielle.

Ce programme a permis de montrer qu'il était **techniquement possible de fabriquer localement des cordages en fibre de coco en Polynésie française**. En effet, des milliers de mètres de cordages ont été fabriqués entre février et décembre 2023, avec une matière première locale, une main d'œuvre locale et des machines présentes sur place. Les partenaires POLYACHT et VAIHUTI FRESH ont démontré la faisabilité technique du processus depuis la collecte, en passant par le rouissage, le défibrage, le tamisage jusqu'au toronnage et au tressage. Les cordages ont été testés en perliculture et en agriculture permettant ainsi d'évaluer la pertinence et l'adéquation de ces cordages en tant qu'alternatives aux cordages PE-HD couramment utilisés par les secteurs.

Les torons fabriqués par la toronneuse et servant de fil de base pour la tresseuse peuvent être commercialisés tels quels, par exemple pour des usages agricoles. En revanche, ces torons ne sont pas résistants en milieu marin. Pour cela, il est impératif de les tresser. De la qualité de la tresse dépendra la durabilité des cordages en fibre de coco immergés dans les lagons.

Pour cette industrialisation, 5 machines sont nécessaires : défibreuse, tami, toronneuse avec peigne, bobineuse et tresseuse. Leurs fiches techniques sont fournies en annexe. A noter que ces machines pourraient être fabriquées au Fenua.

Au-delà du défi économique d'une telle filière³, le défi technique reste toutefois complexe. En janvier 2024, date de la fin du contrat avec PROTEGE, certaines problématiques techniques restent cependant à résoudre :

- La qualité du tressage doit être améliorée en modifiant notamment la toronneuse afin qu'elle puisse toronner dans les deux sens, horaire et anti-horaire.
- Le passage des demi noix de coco dans la défibreuse occasionne des dégâts sur la qualité de la fibre qui se voit abîmée par les éclats de coque. Il convient de trouver un arrangement pour que les coprahculteurs débourent leurs cocos an amont, moyennant compensation financière, afin de ne faire passer que de la bourre dans la défibreuse, et ainsi augmenter la qualité des cordages.

La durée du projet dans le cadre de PROTEGE ne nous a pas permis de fournir des résultats tangibles quant à la résistance des cordages en fibre de coco en milieu marin. En fin de projet, les recherches ont montré que les bactéries présentes dans l'eau de mer n'étaient pas les mêmes partout et que les fibres végétales étaient adaptées à leur environnement.

Ainsi, de nouveaux objectifs sont à définir pour la suite du projet :

- Compléter les premiers résultats de ce projet par une étude de durabilité des cordages en fibre de coco fabriqués en Polynésie française et immergés dans les lagons polynésiens.

³ Voir « Etude de faisabilité économique : Business Plan » - Rédacteurs : Jean Pagny – Benoit Parnaudeau – Thierry Lison de Loma – Christophe Monnier – Novembre 2023



- Etudier la dynamique de colonisation des cordages fabriqués en Polynésie française étendue sur 12 mois avec des sites présentant des conditions environnementales différentes.
- Etudier le taux de fixation des naissains et de leur survie sur différents substrats en milieu naturel similaire permettrait d'observer si les processus physiologiques de l'huître perlière *Pinctada margaritifera* peuvent contrer la toxicité des matériaux.
- Définir au préalable selon quels critères on souhaite remplacer l'utilisation du polyéthylène (impact environnemental ; taux de fixation, survie et larve D de l'espèce élevée ; dynamique de colonisation par la faune fixée ; résistance au sens large etc.)

6) Annexes

A. Annexe 1 : Fiche TORON, exemple code n° T6DR1EM3ED3

		FICHE TORON		SPC PROGRAMME PROTEGE CS22-2308	
		CODE TORON T6DR1EM3ED3			
CODE FIBRE COCO		DR1EM3ED3			
Date de collecte demies noix de coco		30/08/2022		Date Défibrage	30/08/2022
Provenance Demi coco	<i>PF</i>	<i>RAIATEA</i>	-	-	
Nombre de Demi Noix Coco par sac		140			
Couleur Marquage Sac		AUCUN			
Date mise en rouissage Eau de mer		07/09/2022			
Date mise en rouissage Eau douce		07/12/2022			
Date fin de Rouissage		07/03/2023			
Taux humidité dans Demi Noix de Coco avant passage Défibreur					BON
Observations / Apparences					
FABRICATION TORON				Date	08/03/2023
Paramètres Réglages machine		3 / 18 / 7			
Diamètre Fil	5	Diamètre Toron	6		
Longueur Produite	254	Nombre de sac utilisés	1		
Nombre de Bobine	1	Longueur de Bobine	214		
Nombre de Techniciens	2	Temps de Fabrication	2 HRS		
OBSERVATIONS					
Les longueurs sont exprimées en mètre,					
Les diamètres sont exprimés en millimètre.					



B. Annexe 2 : Fiche PROTO, exemple code n° P6T6DR1EM3ED3

FICHE PROTO		SPC PROGRAMME PROTEGE CS22-2308		
		CODE PROTO P6T6DR1EM3ED3		
FABRICATION DU PROTO		Date	21/03/2023	
CODE TORON utilisé	T6DR1EM3ED3	Diamètre Toron	6	
Nombre de Toron dans Proto	6	Longueur Toron	40	
Diamètre Proto	22	Longueur Totale de Toron utilisé	240	
Longueur Proto	35	Coefficient de Réduction	1,14	
PARAMETRE MACHINE	Longueur Toron dans la Bobine de Tressage		40	
Réglage machine	Pas	A	Vitesse	B
Temps de Fabrication	2	Nombre de Techniciens	1	
OBSERVATIONS				
Régularité du Tressage ou du Toronnage - Régularité Diamètre - Aspects visuel et touché				
Problème rencontré à la fabrication				
QUALIFICATION DU PROTO				
Lieu du test Charge de Rupture	Corderie H. Lancelin		Date	21/03/2023
Charge de Rupture Test 1	327	Charge de Rupture Test 3	358	
Charge de Rupture Test 2	312	Charge de Rupture retenue	332	
Poids du cordage produit	0,65	Poids au mètre linéaire	18,57	
Les longueurs sont exprimées en mètre, les diamètres sont exprimés en millimètre,				
Le poids est exprimé en Kg et le poids au mètre linéaire en gr/m.				



C. Annexe 3 : Fiche technique défibreuse

Coconut Defibering Mahine COM15-20



Description

Marque: Cocoman
Modèle: COM15-20
Capacité : Défibre 100 – 150 kg de coco à l'heure
Nb opérateurs: 2
Alimentation électrique: 415V / 3 cv / 50Hz
Puissance nominale: 20,00 cv
Poids: 1000 kg
Dimensions (L x l x h): 2,50 x 1,20 x 2,00 m



D. Annexe 4 : Fiche technique tamis

Coconut Fiber Screener COM15SA



Description

Marque: Cocoman

Modèle: COM15SA

Capacité : Tamise 250– 300 kg de fibre de coco à l'heure

Nb opérateurs: 1

Alimentation électrique: 415V / 3 cv / 50Hz

Puissance nominale: 5,50 cv

Poids: 1500 kg

Dimensions (L x l x h): 8,50 x 2,00 x 2,20 m

E. Annexe 5 : Fiche technique toronneuse

Toronneuse

à approvisionnement de convoyeur automatique



Description

Cette toronneuse permet un apport de fibre automatique sur le convoyeur, facilitant sa mise en œuvre et permettant à un opérateur d'être autonome sur une machine.

Marque: 2M Engineers

Caractéristiques techniques:

- Enroulement automatique des bobines
- Puissance électrique : 2 kW
- Faible besoin en maintenance
- Réduction de la perte en fibre
- Haute productivité
- Sans approvisionnement manuel du convoyeur

Table de Production	
Type de fil (m / kg)	Production sur 8h
280-300	40kg
240-250	50kg
150-160	80kg
80-90	120kg

F. Annexe 6 : Fiche technique bobineuse

Bobineuse



Description

Arrêt automatique lorsque:

- les fils, les fils sont cassés ou vides

- la quantité d'enroulement est prédéfinie, garantit que chaque bobine a une capacité de fils égale

- en cas de casse ou de vide, la bobine de remboursement est dotée d'un dispositif d'auto-freinage

Panneau de commande est fixé sur la gauche de la machine. Le boîtier de roulement et le potentiomètre contrôlent la vitesse des fils d'enroulement

	BFBS-1A	BFBS-2A	BFBS-4A	BFBS-4B
Régime de l'axe	1400 tr/min	1400 tr/min	1400 tr/min	1400 tr/min
Puissance du moteur	0,55KW/220V	0,75KW/220V	1,5KW/380V	1,1KW/380V
Tension	220V/50 Hz	220V/50 Hz	380V/220V/50HZ	380/220V/50HZ
Pas mobile	0,05-5,5 mm (adopter une traverse d'arbre de polissage réglable)			
Taille de la canette	Diamètre de canette D≤100MM Longueur de canette L≤280MM Peut être conçu selon la demande du client			
Canette Non	1	2	4	4
Bobine de	≤9	≤18	≤36	≤36

G. Annexe 7 : Fiche technique tresseuse

Machine de tressage de corde SE 1/12-528



Description

Métier à tresser des cordes SE 1/12-528

Nombre de fuseaux: 12

Bobine Ø 290 x 640 mm = 40.464 ccm

Puissance moteur: 3,0 kW

Vitesse : 40 tr/min

Recommandé pour la production de cordes de 60 mm de diamètre maximum.