

REduction de l'Impact des PLastiques en Conchyliculture



REIPLIC

Janvier 2022 – Mars 2024

LEDOUX Yolène



SMIDAP :
Syndicat Mixte
du Développement de
l'Aquaculture et de la Pêche

Remerciements

Ce projet transdisciplinaire a pu être réalisé grâce au soutien de nombreux acteurs.

Tout d'abord, un grand merci aux partenaires techniques du projet, en particulier, Sarah Bienassis et Marion Petit du Comité Régional Conchylicole des Pays de la Loire, et Charlotte Badouel, Gilles Raibaut, Anne Geoffroy et Laurence Le Bouille du Comité Régional Conchylicole de Bretagne-Sud. Merci aussi à l'ensemble des membres des équipes de ces comités régionaux conchylicoles.

Un grand merci aussi au Conseil Régional des Pays de la Loire, financeur de cette étude. Merci en particulier à Jennifer Champenois et Margaux Favret.

Ce projet n'aurait pas pu être mené à bien sans l'implication des conchyliculteurs dans les essais. Un remerciement en particulier aux mytiliculteurs ayant essayé les filets, soit : Antonio Charpentier, Benjamin Durand, Christophe Porcher, Dave Lamant, Emmanuel Bertaud, Florian Jannot, Gilles Foucher-Maury, Nicolas Pineau, Romain Charpentier, Thibaud Camaret, et Valentin Nauleau. Un remerciement appuyé aussi aux écloséries impliquées dans les essais de caisses à naissain, notamment Laure David de France Naissain, Sophie Keravec de Marinove et Victor Le Goff de Sodabo. Un grand merci aussi à tous les producteurs ayant répondu aux questionnaires, et participé aux essais de seaux pour la vente directe. Un merci spécial à Kateline Raballand de Raballand Damien, particulièrement impliquée dans la démarche de réduction des impacts de son activité et de ses clients.

Un grand merci aux personnes et entreprises ayant réalisé les analyses diverses sur les filets et les conditionnements. Merci en particulier à Margaux Moi d'Upcycle, Camille Lagnet de l'Apesa, Solveig Larsonneur du Smel, Isabelle Calves et Leila Meistertzheim de Plastic at Sea, Julien Gallot et Sylvie Moison de Ligépack, Johann Roos d'IDESYS et Eloi Deramaux de Centrale Nantes.

Je remercie aussi toutes les entreprises ayant participé à la production des alternatives testées. Merci notamment à Raynald Godet de Seabird, Claudine Moroy de Glynka, Giulia Scapin de Galloplastik, Fabrizio Rostellato de Romplastica et Ignacio Molina de Sumbox.

Merci à ceux qui ont apporté de l'expertise, comme Mathilde Gueguen de la coopération maritime.

Un remerciement général à toute la filière conchylicole exerçant sur les Pays de la Loire et à tous ceux qui ont contribué à la bonne réalisation de ce projet.

Table des matières

Remerciements	1
Table des matières	3
Résumé	5
I. Introduction	7
A. Contexte	7
B. Objectifs de REIPLIC.....	8
II. Essais et analyses de filets mytilicoles en plastiques biosourcés	8
A. Contexte réglementaire autour des filets mytilicoles	8
B. Caractéristiques des filets mytilicoles expérimentés	9
1. Types de filets en mytiliculture	9
2. Filets testés	10
C. Essais en conditions réelles	12
1. Conditions d’essais des filets mytilicoles	13
2. Résultats des essais en conditions réelles de filets de catinage	19
3. Résultats des essais en conditions réelles de filets à boudins de naissains	23
4. Conclusions et discussions sur les essais en conditions réelles	23
D. Etude des propriétés mécaniques et du vieillissement des filets de catinage extrudés en SEA212.....	23
1. Méthodologie.....	24
2. Résultats des essais de tractions	25
3. Conclusions et discussions des résultats des essais de tractions	27
E. Essais de biodégradabilité des filets en composteur mécanique	28
1. Définition de biodégradabilité et normes.....	28
2. Méthodologie.....	29
3. Résultats.....	32
4. Conclusions générales sur le compostage en composteur électromécanique, préconisations et mises en garde.....	34
F. Evaluation de l’écotoxicité des filets biosourcés dans le milieu marin	35
1. Distinction écotoxicité aigüe et chronique	35
2. Analyses d’écotoxicité aigüe	36
3. Analyses d’écotoxicité chronique	38
4. Conclusions générales sur l’écotoxicité des matériaux PLA et SEA212	41
G. Impact économique du passage aux filets biosourcé pour les mytiliculteurs	41
H. Conclusions générales sur les essais de filets mytilicoles	42
III. Alternatives aux conditionnements	44

A. Contexte général et réglementaire	44
B. Sacs de vente directe.....	45
1. Enquêtes sur les besoins des utilisateurs	45
2. Essai d'une alternative : les seaux réemployables.....	49
C. Caisses à naissain.....	52
D. Sacs de vente en gros	54
1. Problématiques rencontrées et limites du rPET	54
2. Recherche d'alternatives au rPET	55
E. Conclusions générales sur les alternatives aux conditionnements conchylicoles	55
Bibliographie.....	56
Glossaire	58
Liste des abréviations, sigles et acronymes	59
Liste des figures.....	60
Liste des tableaux.....	62
ANNEXES	63

Résumé

Différents outils de production et conditionnements sont nécessaires afin de produire les coquillages et d'en assurer leur distribution tout en respectant les normes d'hygiène alimentaire. La plupart d'entre eux sont en plastiques pétrosourcés. Vu les problématiques environnementales, économiques et sociales que posent ces matériaux, les conchyliculteurs souhaitent y trouver des alternatives. Pour y répondre, depuis 2019, le SMIDAP, en lien avec les comités régionaux de la conchyliculture de Bretagne Sud et des Pays de la Loire, s'est emparé du sujet via des projets financés par le Conseil Régional des Pays de la Loire. Le dernier en date, REIPLIC, mené de janvier 2022 à mars 2024, vise à approfondir les essais de filets mytilicoles fabriqués à partir de 2 types de matériaux biosourcés certifiés biodégradables en compost industriel (SEA212 et PLA) et à tester des alternatives durables pour 3 des principaux emballages utilisés en conchyliculture : les sacs de vente directe en plastique, les caisses de transport de naissains en polystyrène ainsi que les sacs de vente en gros.

Dans un premier volet, des filets de catinage et des filets à boudins de naissains ont été produits à partir de SEA212 et PLA. Des essais à grande échelle et en conditions réelles ont été menés, principalement pour les filets de catinage. En mer, les filets de catinage en SEA212 se sont montrés plus résistants que les filets en PLA, trop fragiles pour remplir leur fonction. Pour autant, la résistance des filets en SEA212 n'atteignait pas celle des filets conventionnels. Cette observation sur le terrain a été validée par des essais de traction concluants sur une résistance 1,5 fois plus élevée pour le filet conventionnel. Au moment de la pêche, aucune difficulté n'a été relevée pour les filets en PLA, tandis qu'une importante fragmentation des filets en SEA212 a été observée dans les dégrapeurs à dents. Les fragments obtenus risqueraient d'être perdus en mer. Ce constat renforce le besoin déjà identifié de contrôler l'impact des matériaux utilisés sur le milieu marin. Pour ce faire, des analyses écotoxiques ont été menées sur des larves d'oursins et des moules : peu de différences entre les matériaux conventionnels et biosourcés ont été observées au niveau de l'écotoxicité sur les moules. Par ailleurs, des essais de compostage en composteurs électromécaniques ont été réalisés sur les filets en SEA212 après 1 an d'utilisation en mer. Bien que le SEA212 soit un matériau certifié biodégradable en compost industriel, le compost obtenu n'a pas répondu aux exigences de qualité et réglementaires, du fait d'une désintégration trop faible, une persistance des agents pathogènes, et une inhibition de la croissance des plantes (probablement liée à la teneur en sel). Le PLA, non testé en compostage dans ce projet, se désintégrerait probablement assez, mais serait probablement aussi de mauvaise qualité agronomique (pathogènes et sel). Aucune solution de compostage n'a donc été identifiée pour les filets mytilicoles testés. Enfin, d'un point de vue économique, les filets biosourcés pourraient coûter entre 13% et 300% plus cher que les filets conventionnels. Mais un développement des matières biosourcées pourrait réduire ce coût, à terme.

Le bilan de ces essais de filets de catinage en matériaux biosourcés à grande échelle reste donc mitigé étant donné la fragilité des filets et l'absence de solutions de compostage. Néanmoins, vu l'importance du sujet, il pourrait être toujours intéressant de poursuivre le travail de recherche et développement sur ces sujets.

Dans un second volet, une enquête a été menée par LIGEPACK pour déterminer le besoin des utilisateurs en termes de contenants pour l'achat de coquillages en vente directe. Les conchyliculteurs et leurs clients recherchent des emballages résistants, étanches, faciles à nettoyer et équipés de poignées. Des seaux en plastique alimentaire ont été identifiés par LIGEPACK comme adaptés pour répondre à ce besoin. Un essai de 13 440 seaux a été déployé entre les professionnels des Pays de la Loire et de Bretagne-sud, qui se sont fortement impliqués dans la démarche. Des retours très positifs de la part des clients ont été relevés. Vu ces résultats très encourageants, il serait pertinent de poursuivre les essais sur une période plus longue (et incluant la période estivale).

En parallèle de ces essais, des tests de caisses en carton étanche ont été réalisés par 3 écloséries qui ont apprécié la résistance du matériau, mais la faible isothermie et la difficulté du pliage ont été dissuasifs. D'autant plus que les volumes concernés restent faibles pour amortir l'achat d'une plieuse.

En revanche, des difficultés d'approvisionnement n'ont pas permis de réaliser les tests de sacs de vente en gros en PET recyclé initialement prévu.

I. Introduction

A. Contexte

La conchyliculture française se situe au 2^{ème} rang Européen¹ en termes de production avec 145 000 tonnes de coquillages produites en 2020. Parmi les régions productrices, les 450 km de côtes des Pays de la Loire présentent des conditions très favorables à la production de coquillages. Cette production implantée dans la région au cours du 19^{ème} siècle², n'a cessé de se développer avec les innovations de chaque époque. Parmi elles, le plastique. Apparu dans les années 1950, ce matériau a conquis de nombreux secteurs d'activités, y compris la conchyliculture. Ces propriétés permettent à la fois d'obtenir souplesse, robustesse, étanchéité et légèreté, à un faible coût. Cela en fait le matériau idéal pour la fabrication d'emballages et d'outils de production conchylicoles. Malheureusement, plusieurs de ces éléments nécessaires à la production coquillière, ne sont pas ou peu valorisés en fin de vie, et sont visés par les réglementations Françaises et Européennes qui ont notamment pour objectifs de réduire l'utilisation des plastiques et l'enfouissement des déchets. Ces régulations passent par l'interdiction de mise sur le marché de certains produits, l'augmentation des taxes de l'enfouissement, et la mise en place d'écocontributions pour financer le traitement des déchets professionnels et engins de pêche (loi AGEC).

L'élevage de coquillages est une activité à faible impact. Néanmoins en travaillant directement au contact du milieu marin, certains des éléments de productions utilisés peuvent tout de même être perdus en mer. Cette pollution visible sur les plages ternit l'image de la profession qui reste fortement impliquée pour préserver la qualité de l'environnement marin dont elle dépend.

La profession est notamment inscrite depuis plusieurs années dans des démarches de réduction de l'impact des plastiques utilisés dans leur filière. Les professionnels avaient notamment manifesté leur intérêt pour s'atteler aux filets mytilicoles et aux conditionnements conchylicoles. Face à cette demande, le Syndicat Mixte du Développement de l'Aquaculture et de la Pêche (SMIDAP), en partenariat avec les Comités Régionaux de la Conchyliculture de Bretagne-Sud (CRC BS) et des Pays de la Loire (CRC PDL) ont porté 3 projets, pilotés par le SMIDAP, et financés par le Conseil Régional des Pays de la Loire : BIOFILET, FILALTIQ et REIPLIC.

Le projet BIOFILET (Julie Maheut, SMIDAP, 2019), initié en 2019, avait pour objectif de tester des prototypes de filets de catinage extrudés développés par les fabricants INTERMAS et ECOPLAS. Malheureusement, ces prototypes se sont avérés trop fragiles pour maintenir les moules. C'est pourquoi, par la suite, un deuxième projet a été mis en place, FILALTIQ (Julie Maheut, SMIDAP, 2020-2021), de 2020 à 2022, qui avait cette fois-ci deux ambitions :

- Poursuivre la recherche et le développement de filets de catinage, mais en identifiant et testant des matériaux biosourcés et biodégradables en compost industriel, ayant des caractéristiques similaires aux matériaux utilisés conventionnellement pour les filets de catinage.
- Se pencher aussi sur les conditionnements conchylicoles en enquêtant auprès de la profession sur les principaux emballages utilisés en conchyliculture.

Deux matériaux avaient été identifiés pour la production de filets de catinage, le SEA212 et l'acide polylactique (PLA). Des prototypes de filets extrudés et tricotés de ces deux matériaux ont donc été testés en conditions réelles sur quelques pieux, et des analyses physico-chimiques ont été réalisées.

¹ (Secrétariat général de la mer et Clusteur Maritime Français, 2022)

² (Comité National de la Conchyliculture, s.d.)

Comme les résultats se sont avérés plutôt satisfaisants, les professionnels ont souhaité pousser les essais plus loin et tester les filets à grande échelle.

Côté conditionnements, deux enquêtes ont été réalisées et ont permis d'identifier les 4 emballages les plus utilisés en conchyliculture : les sacs de vente en gros, les sacs de vente directe, les caisses de transport de naissains et les bourriches. Une étude bibliographique a été menée pour suggérer des alternatives potentielles que les professionnels ont souhaité tester.

C'est donc face aux conclusions de FILALTIQ et pour répondre aux attentes de la profession qu'est né le projet REIPLIC.

B. Objectifs de REIPLIC

Le projet REIPLIC, porté par le SMIDAP en partenariat avec les Comités Régionaux de la Conchyliculture des Pays de la Loire et de Bretagne-Sud, de janvier 2022 à mars 2024, avait pour objectifs de :

- Poursuivre et enrichir les essais de filets mytilicoles initiés dans FILALTIQ, à plus grande échelle. Mais aussi, approfondir les analyses physico-chimiques, économiques et de fin de vie des filets afin d'en étudier les possibilités de développement et d'application directe sur le territoire
- Essayer des alternatives aux conditionnements conchylicoles en plastiques, notamment pour trouver des alternatives aux sacs de vente directe, caisses en polystyrène et sacs de vente en gros.

II. Essais et analyses de filets mytilicoles en plastiques biosourcés

A. Contexte réglementaire autour des filets mytilicoles

Au regard de la réglementation, les filets mytilicoles une fois utilisés sont considérés comme des déchets produits par les mytiliculteurs. Le **code de l'environnement** impose aux entreprises de gérer les déchets qu'elles produisent. Ils doivent ainsi s'assurer que leur élimination est conforme à la réglementation^{3, 4}. Le rejet dans le milieu marin est sanctionné par la même réglementation.⁵

Actuellement, il existe 2 solutions d'élimination des filets mytilicoles : l'incinération ou l'enfouissement. En Pays de la Loire et Bretagne-Sud, c'est l'enfouissement qui est privilégié, soit par apport individuel en déchetterie, soit par des dispositifs de collecte groupée opérés par des prestataires publics ou privés.

Vu les objectifs nationaux de réduction de la part des déchets enfouis, la TGAP, ou Taxe générale sur les activités polluantes, payée pour l'enfouissement, est amenée à augmenter dans les années à venir. Cette augmentation aura donc un impact sur les charges des professionnels si aucune autre solution de traitement n'est possible.

Par ailleurs, en juin 2019, le Parlement Européen et le Conseil de l'Union Européenne ont adopté la Directive (UE) n° 2019/904 visant à prendre des mesures pour réduire l'incidence de certains produits en plastique sur l'environnement. Cette directive, transposée partiellement par la **Loi Anti-Gaspillage pour une Economie Circulaire** (AGEC) du 10 février 2020, prévoit en plus la création d'une filière de **responsabilité élargie du producteur** (REP) pour les engins de pêche contenant du plastique, avant janvier 2025. Les engins de pêche sont légalement définis comme : « *tout élément ou toute pièce d'équipement qui est utilisé(e) dans le cadre de la pêche ou de l'aquaculture pour cibler, capturer ou élever des ressources biologiques de la mer, ou qui flotte à la surface de la mer, et est déployé(e) dans*

³ (Code de l'environnement, Art. L 218-73)

⁴ (Code de l'environnement, Art. L 541-1)

⁵ (Code de l'environnement, Art. L 218-73)

le but d'attirer et de capturer ou d'élever de telles ressources biologiques de la mer ». Les filets mytilicoles font donc partie intégrante de cette définition et sont donc soumis à la filière REP. Le principe d'une filière REP implique le versement d'une contribution financière des metteurs en marché pour la prévention et la gestion des déchets issus de ces produits.

Pour réagir à cette décision, différents projets ont été menés entre 2019 et 2022 par la Coopération Maritime pour accompagner la mise en place d'une filière volontaire nationale de gestion des engins de pêche usagés⁶. Ces travaux ont permis de créer un groupe de travail avec les metteurs en marché d'engins de pêche et de matériel conchylicole volontaire, dans le but d'impulser la mise en place d'une filière volontaire (répondant au principe de Responsabilité Elargie du Producteur – REP), avant l'échéance du 1er janvier 2025. Après plusieurs mois sur un projet de création d'une structure ad hoc, les 5 metteurs en marché mobilisés ont finalement fait le choix de s'adosser à un éco-organisme déjà existant : Ecologic. A l'été 2023, un communiqué de presse a été publié pour officialiser cet adossement et Ecologic a pris contact avec l'état pour proposer un calendrier des actions à mettre en œuvre avant le 1^{er} janvier 2025. Bien qu'Ecologic soit un éco-organisme intervenant pour des filières réglementées, dans le cadre des engins de pêche, si les propositions de l'éco-organisme sont acceptées, la filière sera créée en mode volontaire (non réglementée). Cependant, pour le moment, le fonctionnement et les montants relatifs aux éco contributions sont encore en cours de réflexion et ne permettent pas à ce jour, d'avoir une idée de l'impact sur la profession.

En parallèle, la Coopération Maritime a aussi monté un projet sur 2023-2024, avec le Comité National de la Conchyliculture (CNC) pour mettre en place une filière ECU (Engins Conchylicoles Usagés).

C'est dans ce contexte que la recherche de nouvelles solutions de traitement des filets est intéressante. Le compostage de filets mytilicoles rentre donc en adéquation avec la volonté nationale de réduire l'enfouissement, et pourrait permettre à terme de réduire la charge financière de gestion de la fin de vie. Mais il est primordial de s'assurer que les filets développés en matériaux biosourcés et biodégradables en compost industriel sont à la fois performants, inertes pour l'environnement et peuvent effectivement se composte après plusieurs mois en mer. Tous ces éléments font l'objet d'essais et analyses réalisés dans le cadre de REIPLIC.

B. Caractéristiques des filets mytilicoles expérimentés

1. Types de filets en mytiliculture

En mytiliculture, plusieurs types de filets sont utilisés lors du cycle d'élevage. En début de cycle de production, pour garnir les pieux, il est possible d'utiliser des **filets à boudins de naissain**, remplis de péliste de moules. La péliste est l'excédent de naissains fixé naturellement sur les pieux. Les boudins sont ensuite enroulés autour des pieux (Cf : Figure 1). En fonction de la hauteur des pieux, 1 à 2 filets à boudins peuvent être mis.



FIGURE 1 : BOUDINS DE MOULES ET PIEUX GARNI



FIGURE 2 : PIEU RECOUVERT D'UN FILET DE CATINAGE

⁶ (Coopération Maritime, s.d.)fr/

Une fois les pieux garnis, et afin de les protéger des aléas climatiques, ils sont recouverts d'une première couche de filet dit de **catinage** (Cf : Figure 2). D'autres couches peuvent être ajoutées par la suite en fonction des pratiques et du développement des moules sur les pieux.

Ces 2 types de filets (filet à boudin de naissain et filet de catinage) peuvent être produits de deux manières : soit par extrusion soit par tricotage :

- Les filets « extrudés » sont conçus à partir de granulés de plastique (polypropylène, polyéthylène) qui sont ensuite versés dans une machine d'extrusion, où ils sont chauffés et mis en forme de façon à obtenir en sortie des filets maillés. Il n'existe pas d'industrie en France qui possède cette technologie de fabrication pour ce type de filets. Les fabricants recensés en Europe sont au nombre de quatre : deux en Italie (Rom Plastica, Galloplastik) et deux en Espagne (Intermas, Ecoplas).
- Les filets « chaînette » ou « tricotés » sont conçus également à partir de granulés de plastique (polyester, polypropylène) qui passent par une première étape de fabrication de fil multifilaments : un fil composé d'une multitude de fibres synthétiques. Ce fil est ensuite utilisé dans des machines de tricotage. Des entreprises sont implantées en France, telles que la société Glynka ou la société Filt.⁷

Sur les secteurs mytilicoles des Pays de la Loire et de Bretagne-Sud, la plupart des filets de catinage utilisés sont extrudés, sauf au niveau de la Plaine-sur-Mer, qui utilise aussi des filets tricotés.

Quant aux filets à boudins, la plupart sont tricotés, sauf pour le secteur de l'Aiguillon qui utilise des filets à boudins extrudés.

2. Filets testés

Lors du projet FILALTIQ, une étude des caractéristiques physico-chimiques des filets conventionnels avait été menée et a permis d'identifier :

- Un bioplastique extrudable biosourcé (100% ou partiellement) aux propriétés similaires et compostable en compost industriel : le SEA212
- Un bioplastique tricotable biosourcé (100% ou partiellement) aux propriétés similaires et compostable en compost industriel : le PLA

Dans le cadre de REIPLIC, des filets à boudins et de catinage de chaque type (tricoté et extrudé) ont été produits et testés avec ces deux matériaux biosourcés (ou partiellement), certifiés compostables en composteur industriels, le SEA212 et le PLA.

a) Filets de catinage testés

(1) Production des filets de catinage extrudés en SEA212

Le matériau identifié, et précédemment testé dans FILALTIQ pour les filets de catinage extrudés était le **SEA212** produit par la société lorientaise **SEABIRD**. Ce matériau, en partie biosourcé et en partie pétrosourcé est certifié biodégradable en compost industriel par les normes EN 13432, ASTM 6400 et DIN-Geprüft. Au début de FILALTIQ, SEABIRD assurait un minimum de 35% de biosourcé, ils ont ensuite augmenté leur minimum à 70%⁸ et souhaitent encore augmenter ce taux.



FIGURE 3 : FILET DE CATINAGE EXTRUDE (SEA212)

⁷ (Julie Maheut, SMIDAP, 2020 - 2021)

⁸ (SEABIRD, s.d.)

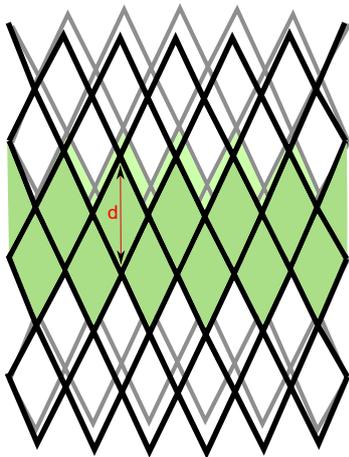


FIGURE 4 : SCHEMA D'EXPLICATION DES DIMENSIONS DE FILETS

Dans le cadre de REIPLIC, 200 kg de granulés ont été commandés auprès de SEABIRD et envoyés à GALLOPLASTIK, société italienne, experte en fabrication de filets mytilicoles. 17 km de filets de catinage extrudés avec un grammage de 18 grammes de granulé par mètres (g/m) ont été produits (le grammage 18 g/m ayant été identifié dans FILALTIQ comme le meilleur compromis coût/résistance). Les filets ont été produits dans 3 dimensions 36/75, 36/95 (références classiques des 2 premières couches) et 36/105. Le 36/100 avait été produit dans FILALTIQ, mais il n'était pas assez large pour un des producteurs. Il a donc été convenu de produire un filet légèrement plus large pour être utilisé avec les engins à catiner conventionnel. Pour ce faire, une nouvelle filière d'extrusion a été produite.

Pour comprendre comment sont nommées les dimensions, le 36 correspond au nombre de losanges comptés sur 2 « lignes » d'un filet (losanges en vert sur la Figure 4). Tandis que le 2^{ème} numéro (75, 95, 105), fait référence à la distance entre 2 nœuds en mm (distance d sur la Figure 4).

(2) Production des filets de catinage tricotés en PLA

Dans FILALTIQ, le matériau identifié et précédemment testé pour les filets de catinage tricotés était le PLA (acide polylactique), produit par la société néerlandaise SENBIS, sous forme de fil. Le PLA est un matériau 100% biosourcé et certifié compostable en compost industriel. Deux PLA avaient été testés, de SENBIS et de PONSA, mais les résultats des filets produits avec le fil SENBIS étaient plus intéressants.



FIGURE 5 : FILET DE CATINAGE TRICOTE (PLA)

Pour le projet REIPLIC, ce sont 200kg de fil PLA 1100 Dtex (Décitex) Senbis qui ont été envoyés à l'entreprise française de tricotage de filets GLYNKA. Cette dernière a pu produire 15km de filets de catinage avec cette matière en 3 dimensions (pour assurer 3 couches de catins) : 16/34, 16/44 et 16/50 (équivalent aux tailles 36/75, 36/90 et 36/100 des filets extrudés). Sur ce type de filets, le 16 correspond au nombre de losanges sur une seule ligne du filet, et le 2^{ème} numéro (34, 44 ou 50) correspond à la taille du côté des losanges.

b) Filets à boudins de naissain testés

(1) Production des filets à boudins extrudés en SEA212

Pour la production des filets à boudins extrudés, le SEA212 de Seabird a aussi été choisi. Un premier essai de production a été effectué auprès de GALLOPLASTIK. Malgré la fabrication d'une filière dédiée, l'entreprise non habituée à ce produit, n'est pas parvenue à produire les filets. A la place, l'entreprise concurrente, ROMPLASTICA a été contactée. Cette entreprise produit habituellement les filets à boudins conventionnels utilisés sur le secteur de l'Aiguillon. Elle a accepté de faire un essai avec les granulés de SEA212. La production a nécessité quelques réglages de machines, mais ROMPLASTICA est parvenue à extruder son filet nommé « DUALNET »⁹ à partir des granulés de SEA212. A partir de 150kg, 16 bobines de



FIGURE 6 : FILET A BOUDIN EXTRUDE (SEA 212)

⁹ (ROMPLASTICA, s.d.)

500m de filets ont pu être produites, avec une perte de matériel estimée à 22kg, ce qui a été qualifié de raisonnable par l'entreprise.

(2) Production des filets à boudins tricotés en PLA

Les filets à boudins tricotés ont été produits avec des fils de PLA (trame principale, en bleu - Figure 7) et des fils de coton (trame secondaire, en jaune - Figure 7). Les filets à boudins traditionnels sont composés de PP ou PE et de coton. Le coton a été fourni par GLYNKA, via ses fournisseurs habituels. Le PLA a été fourni par une autre entreprise, **POLISILK**. En effet, il s'agissait de la seule entreprise à pouvoir fournir du PLA en 550 Dtex, épaisseur de fil qui avait été identifiée dans FILALTIQ pour se rapprocher au mieux des produits conventionnels. Même si le matériau a la même dénomination que pour la fabrication des filets de catinage tricotés, les additifs utilisés peuvent être différents et changer les paramètres physico-chimiques du matériau, et notamment sa tenue et ses capacités de biodégradation. Néanmoins ce PLA est aussi certifié compostable en compost industriel.



FIGURE 7 : FILET A BOUDIN TRICOTE (PLA + COTON)

Pour le tricotage, la même société française, GLYNKA, a été choisie. Le tricotage a pu se faire, mais le fil semblait plus glissant, et il a été plus difficile d'ajuster les paramètres pour obtenir le parfait embobinage. Cela n'a pas empêché la production de 15 bobines de 1000m de filet à boudins de naissain en taille 8/25.

c) Tableau récapitulatif des filets testés

Type filet	Process	Fabricant matériau	Fabricant usinage	Matériau	Dimensions
Filet de catinage	Extrusion	SEABIRD	GALLOPLASTIK	SEA212, 18 g.m	36/75,36/95,36/105
Filet à boudins	Extrusion	SEABIRD	ROM PLASTICA	SEA212, 18 g.m	Non précisé
Filet de catinage	Tricot	SENBIS	GLYNKA	PLA 1100 Dtex	16/34, 16/44,16/50
Filet à boudins	Tricot	POLISILK ; Fournisseur de GLYNKA	GLYNKA	PLA 550 Dtex ; coton	8/25

C. Essais en conditions réelles

Une fois produits, les filets ont été testés en conditions réelles d'utilisation par plusieurs professionnels. La plupart d'entre eux avaient déjà participé aux essais de filets dans BIOFILET et FILALTIQ. Ils étaient donc en mesure de comparer leurs nouvelles observations avec les observations précédemment faites. Ces essais ont permis d'évaluer la performance des filets proposés par rapport aux filets conventionnels et de rendre compte de l'avis de la profession sur ces filets.

1. Conditions d'essais des filets mytilicoles

a) Implication des producteurs et localisation

8 mytilculteurs, affiliés au CRC Bretagne-Sud ou au CRC des Pays de la Loire se sont portés volontaires pour tester les filets en matériaux biosourcés et biodégradables en compost industriel. Leur localisation permet de couvrir toute la façade des Pays de la Loire et de tester les filets sur plusieurs bassins dans des conditions d'exposition et géomorphologiques variées.

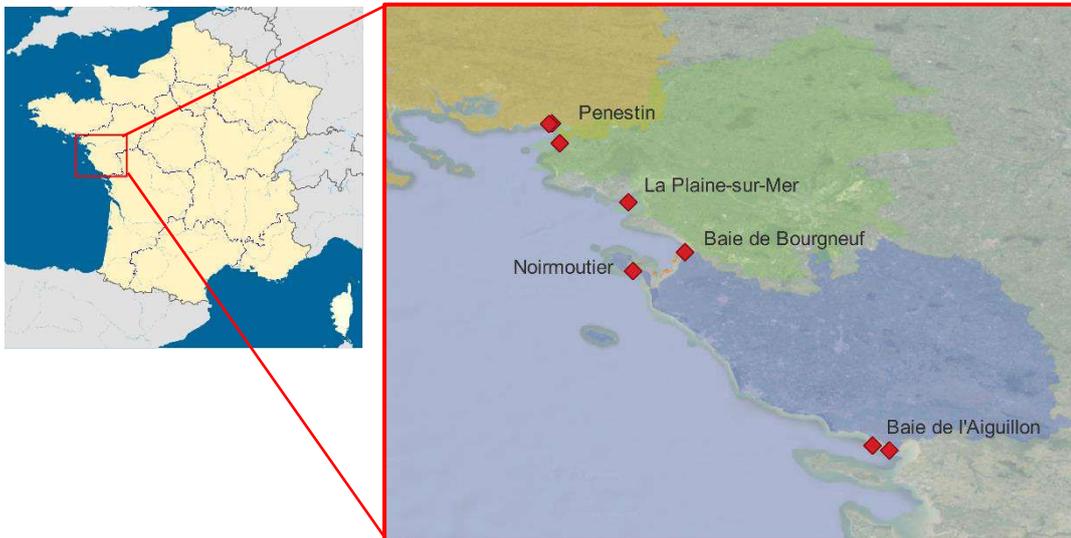


FIGURE 8 : LOCALISATION DES MYTILCULTEURS PARTICIPANTS AUX ESSAIS DE FILETS

TABLEAU 1 : PRESENTATION DES SITES D'ESSAIS

Secteur de production	Nom du site	Degré d'exposition Faible (1), modéré (2), fort (3)
Pénestin	Kervoyal 1	2
Pénestin	Kervoyal 2	2
Pénestin	Le Bile	1
La Plaine-sur-Mer	Banc du Nord	3
Baie de Bourgneuf	La Northe	3
Ile de Noirmoutier	La Guérinière	2
Baie de l'Aiguillon	Les Norois	2
Baie de l'Aiguillon	La Barrique	3

b) Méthodologie

La performance des filets en conditions réelles a été étudiée pendant toutes les phases d'utilisation de filets mytilicoles, sur l'ensemble de la durée d'une saison mytilicole (1 an). Chaque mytilculteur a mis à disposition une ligne complète de bouchots pour l'expérimentation, soit, environ 100 à 150 pieux, selon les secteurs. Le travail sur une ligne complète permettait de mieux se rendre compte de la fiabilité des filets, auparavant testés sur 5 pieux.

La performance des filets a été analysée à toutes les étapes de leur utilisation via les observations faites sur le terrain et le retour des professionnels. Ces étapes d'utilisation des filets sont détaillées ci-après.

A noter qu'à chaque étape une note de 1 à 5 a été attribuée, la moyenne générale des notes ayant été validée via un code couleur (vert foncé pour 5/5, à rouge foncé pour 1/5) en comité de pilotage (COPI).

(1) Etapes des essais de filets de catinage

(a) Manipulation : Découpe

A réception des bobines, et avant de partir en mer, les filets sont découpés à la longueur désirée qui dépend de la hauteur des pieux sur lesquels ils seront posés (entre 2 et 5m). Les filets sont ensuite noués à une extrémité.

(b) Manipulation : Pose

Une fois préparés, les filets sont embarqués pré-découpés et sont ensuite enfilés sur un engin à catiner. L'engin à catiner permet d'enfiler les filets comme une chaussette sur les pieux. (cf Figure 9).



FIGURE 9 : DE GAUCHE A DROITE, ENFILAGE DU FILET SUR L'ENGIN A CATINER ; ENFILAGE SUR LE PIEU ; PIEU TOUT JUSTE COUVERT D'UN FILET

(c) Performance zootechnique

L'évolution de la pousse des moules a été observée tout au long de l'année. Un bon filet doit permettre aux moules de pousser (sortir des mailles) tout en assurant le rôle de maintien (pas de déchirement). Le rendement final de la ligne catinée avec les filets biosourcés et compostables a été comparée au rendement d'une ligne témoin, catinée avec des filets conventionnels.

Le calcul du rendement est expliqué à l'étape suivante : la pêche.

(d) Pêche et tri

Lorsque les moules sont arrivées à maturité, au bout d'un an, entre mai et septembre pour les Pays de la Loire et Bretagne-Sud, elles sont pêchées à l'aide d'une pêcheuse qui vient entourer le pieu et prélever l'ensemble moules et filets (Figure 10, photo 1 et 2). Le contenu est ensuite soit déversé dans une caisse-palette, appelée géobox, (Figure 10, photo 3), soit directement dans un dégrappeur si un pré-tri se fait à bord (Figure 10, photo 4). Autrement la caisse est vidée à posteriori au niveau de la chaîne de tri, à terre (Figure 10, photo 5).



FIGURE 10 : DE GAUCHE A DROITE ; 1 - PECHUSE AUTOUR D'UN PIEU ; 2 - PECHUSE RELEVÉE APRES PÊCHE DU PIEU ; 3 - DEVERSEMENT DU CONTENU DE LA PECHUSE DANS UNE CAISSE-PALETTE ; 4 - DEGRAPPEUR ; 5 - ENSEMBLE DE CHAÎNE DE TRI A TERRE

La chaîne de tri permet de séparer les moules consommables des résidus de filets, des autres organismes et co-produits (algues, cravants, et autres éléments hors moules) ainsi que des moules trop petites pour la consommation. Chaque professionnel possède son propre système de nettoyage-tri. En général, les chaînes de tri sont constituées à minima :

- D'un dégrappeur, permettant de séparer les filets du reste ;
- D'une laveuse permettant de pré-calibrer les moules et de les nettoyer. Un géobox est installé sous cette machine pour récupérer les rejets ;
- D'une calibreuse permettant de trier uniquement les moules de tailles commerciales. Un géobox est aussi installé sous cette machine pour récupérer les moules « sous taille » ;
- D'un tapis de tri manuel pour enlever les anomalies (moules cassées, moules avec trop de balanes etc...).

A cette chaîne peuvent s'ajouter d'autres machines telles que (liste non exhaustive) :

- Les laveuses espagnoles avec une vis sans fin, qui permet un premier lavage des moules et un premier tri, avant la laveuse principale ;
- Les débysseuses, qui permettent d'enlever le byssus des moules.

Pour l'expérimentation, sur cette phase, il était nécessaire de vérifier :

- Que les filets testés n'entravaient pas le fonctionnement des chaînes de tri ;
- Que les filets permettaient d'obtenir un produit trié de qualité ;
- Que les filets ne relarguaient pas de microplastiques dans la chaîne, et spécifiquement dans les bacs de tri, dont le contenu est souvent réutilisé ou relargué en mer.

Pour cela, la tenue des filets dans les dégrappeurs ainsi que la fragmentation des filets dans les différentes machines ont été contrôlés.

(i) Comportement des filets dans les dégrappeurs

Deux types de dégrappeurs sont utilisés par les professionnels partenaires du projet : les dégrappeurs à dents (Figure 11) et les dégrappeurs coniques (Figure 12). Le comportement des filets dans les dégrappeurs a été évalué visuellement par les professionnels en comparaison avec leurs habitudes. Les filets doivent, idéalement, bien s'accrocher dans les dents ou picots, sans trop se fragmenter pour rester entièrement piégés. La fragmentation des filets dans les machines pourrait libérer des fragments de plastiques dans les rejets (moules trop petites/cassées et autres organismes). Cette part est habituellement rejetée en mer ou réutilisée pour garnir des pieux. Afin d'éviter de relarguer des microplastiques, il est donc nécessaire de s'assurer de la bonne séparation des filets par les machines.



FIGURE 12 : DEGRAPPEUR CONIQUE ; VUE EXTERIEURE ; VUE INTERIEURE



FIGURE 11 : DEGRAPPEUR A DENTS ; VUE EXTERIEURE ; VUE INTERIEURE

(ii) Fragmentation

Pour évaluer la fragmentation des filets, le protocole suivant a été appliqué chez 2 mytilculteurs du secteur de Pénestin effectuant le tri à terre (le protocole étant difficilement applicable en mer, en pleine période de pêche). L'un d'entre eux possédant un dégrappeur à dents, l'autre un dégrappeur conique.

Préparation des filets

Pour chacun des 2 mytilculteurs, au moment de la pêche, des caisses-palettes (ou bacs) sont remplies séparément avec soit uniquement des pieux catinés avec des filets conventionnels, soit uniquement des pieux catinés avec les filets en matériaux biosourcés testés (extrudés ou tricotés). A noter que la comparaison avec les filets conventionnels tricotés n'a pas été faite puisque les professionnels concernés par le suivi n'utilisaient pas ce type de filets.

Le nombre de pieux par bac et le nombre de filets par pieux sont annotés.

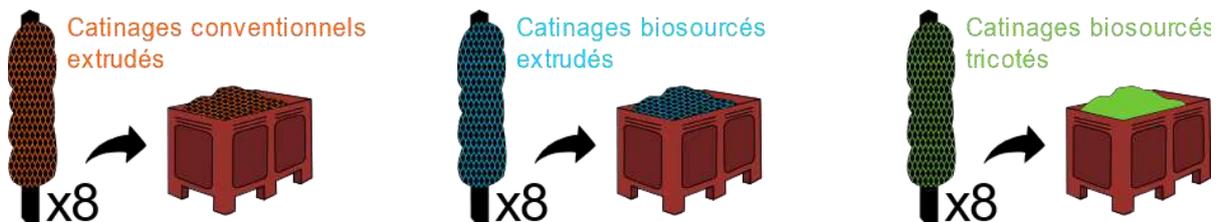


FIGURE 13 : SCHEMA – ISOLATION DES PIEUX CATINES AVEC LES DIFFERENTS FILETS DANS DES BACS SEPARES

Préparation et identification de la chaîne de tri

Dans le cadre de l'expérimentation, avant le passage d'une caisse-palette remplie de moules + filets dans la chaîne de tri, la chaîne de tri est entièrement lavée pour retirer les résidus de filets précédents. Aussi, chaque machine de la chaîne de tri et leurs bacs de rejets sont identifiés. Tous ces bacs sont préalablement vidés. Ci-dessous, le détail des machines pour les deux chaînes de tri des professionnels participants à l'expérimentation, et la position des bacs de rejets :

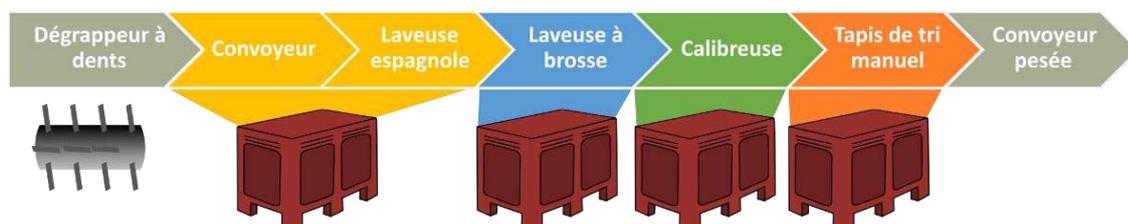


FIGURE 14 : SCHEMA DE LA CHAÎNE DE TRI COMPORTANT LE DEGRAPPEUR A DENTS, ET POSITION DES BACS DE REJETS (BACS ROUGES)

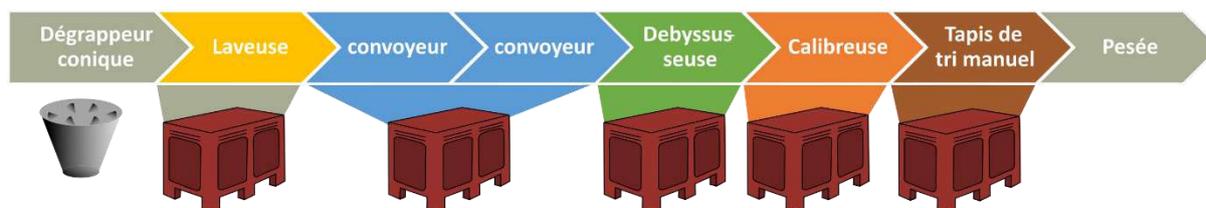


FIGURE 15 : SCHEMA DE LA CHAINE DE TRI COMPORTANT LE DEGRAPPEUR CONIQUE, ET POSITION DES BACS DE REJETS (BACS ROUGES)

Passage des caisses-palettes dans la chaîne de tri

Dans le cadre de l'expérimentation, chaque bac contenant les moules pêchées et les filets est pesé plein et à vide. Puis, le contenu d'un bac est déversé dans la chaîne de tri qui est activée et gérée comme habituellement. Une fois tout le contenu trié, les bacs de rejets sont isolés et annotés. La chaîne est ensuite relavée pour passer le bac suivant.

(iii) Comptage et identification des fragments

Pour chaque type de filets et chaque bac de rejet, les fragments de filets résiduels sont comptés et classés par catégorie de taille : inférieur à 2,5 cm ; compris entre 5 et 10 cm, compris entre 10 et 30 cm ; supérieur à 30 cm. La fiche de relevé de terrain est consultable en annexe 1.

(iv) Rendement net par pieu

Pour calculer le rendement net par pieu (poids de moules commercialisables par pieu), 3 pieux conventionnels et 3 pieux biosourcés sont pêchés et isolés dans les bacs. Chaque bac est pesé puis passé seul dans la chaîne de tri. Les moules commercialisables et le bac vide sont pesés. Le rendement est obtenu selon la formule suivante :

$$\frac{P_{\text{moules commercialisables}}}{P_{\text{bac plein}} - \text{tare bac vide}} \div \text{nombre pieux pêchés}$$

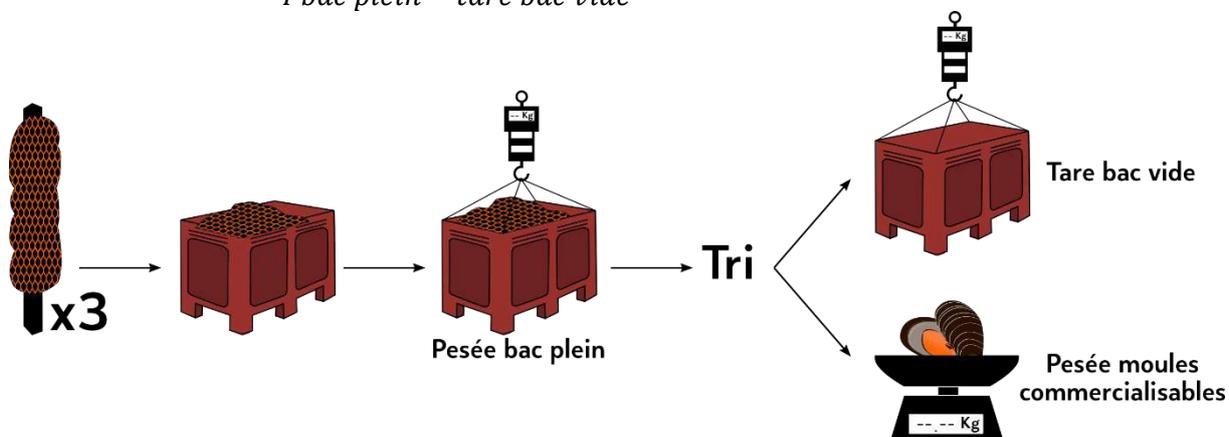


FIGURE 16 : SCHEMA PROTOCOLE DE CALCUL DE RENDEMENT NET PAR PIEU

(2) Etapes des essais en conditions réelles des filets à boudins

(a) Manipulation : Découpe et remplissage

Les filets à boudins sont découpés en amont à la taille désirée, de la même manière que les filets de catinage. Un nœud est réalisé à une extrémité du boudin, souvent avec un élastique. Les filets à boudins sont ensuite remplis, soit :

- Manuellement, avec une table à faire des boudins (Figure 17, à gauche). Les filets à boudins sont enfilés le long des tubes (1), et les moules, déposées sur la table (2) sont poussées dans le filet à la main, jusqu'à remplir intégralement le boudin.

- A l'aide d'une machine (Figure 17, à droite). Les filets sont enfilés autour du tube (3), et les moules viennent les remplir par le haut, poussées par une vis sans fin (4). Un ouvrier accompagne le remplissage.



FIGURE 17 : A GAUCHE, TABLE A BOUDINS, A DROITE, MACHINE A BOUDINS

Quelle que soit la méthode, les boudins sont ensuite fermés par un nœud, et souvent un élastique.

Pour vérifier que les boudins sont performants, on contrôle que les mailles se tiennent, que les moules se tiennent bien et ne passent pas à travers, et que les filets sont facilement noués.

(b) Manipulation : Pose

Chaque boudin formé (Figure 17, photo de droite, au premier plan) est ensuite attaché à un pieu par un élastique puis enroulé autour de celui-ci, et fixé aussi à la base par un autre élastique. Il est nécessaire que pendant toute cette étape, les moules se tiennent dans le filet, et que le filet ne craque pas.

(c) Performances zootechniques

Les filets à boudins ont pour rôle de maintenir le naissain le long du pieu. Les moules doivent être tenues, mais doivent pouvoir, dès les premiers jours, passer au travers des mailles pour se développer.

c) Calendrier des essais

Les filets de catinage ont été testés sur 2 saisons différentes (cf Tableau 2). Pour les filets à boudins, les conditions climatiques et la faible quantité de naissains n'ont permis qu'à un seul professionnel d'essayer uniquement les filets à boudins extrudés en SEA212. Une vingtaine de boudins ont ainsi été disposés courant octobre 2023.

TABLEAU 2 : CALENDRIER DES ESSAIS DE FILETS DE CAITNAGE EN MATERIAUX BIOSOURCES ET COMPOSTABLES

2021				2022								2023															
S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Essais conditions réelles filets biosourcés extrudés SEA212																											
Catinage (2 couches)										Pêche																	
																Essais conditions réelles filets biosourcés tricotés PLA											
																Catinage (2 à 3 couches)						Pêche					

2. Résultats des essais en conditions réelles de filets de catinage

a) Filets extrudés en SEA212

Les résultats des essais en conditions réelles sont présentés ci-après.

(1) Manipulation : Découpe

Les filets se déroulent bien et se découpent de manière similaire aux filets conventionnels. Une petite attention doit cependant être accordée au moment du nouage, car le matériau un peu plus lisse a tendance à défaire les nœuds.

(2) Manipulation : Pose

La pose se fait de manière similaire à la pose des filets conventionnels. Pour 2 des 8 professionnels, les filets semblent néanmoins plus fragiles que les conventionnels.



FIGURE 18 : POSE DES FILETS DE CATINAGE EXTRUDÉS EN SEA212

(3) Performance zootechnique

Les filets ont permis de bien accompagner la pousse des moules sans casse majeure. Les moules ont pu naturellement pousser et sortir des mailles (cf Figure 19). Néanmoins, sur l'année testée, les conditions météorologiques sont restées très clémentes et l'ensemble des professionnels doutent que la résistance des filets soit suffisante dans des conditions plus agitées.

Le bon accompagnement des moules est confirmé par un rendement similaire entre les pieux catinés par des filets conventionnels et les pieux catinés par les filets extrudés en SEA212, matériau biosourcé et compostable.



FIGURE 19 : MOULES RESSORTIES DES FILETS SUR UN PIEU

(4) Pêche et tri

Au moment de la pêche, les filets extrudés en SEA212 ont bien permis de retenir les moules dans la pêcheuse.

Par la suite, pour les professionnels utilisant les dégrappeurs coniques, les filets se prenaient bien dans le dégrappeur, mais étaient plus cassants que les filets conventionnels. L'utilisation de ces filets n'entravait cependant pas le bon fonctionnement du dégrappeur.

Pour les professionnels utilisant des dégrappeurs à dents, une certaine fragmentation des filets était visible à l'œil nu à l'utilisation.

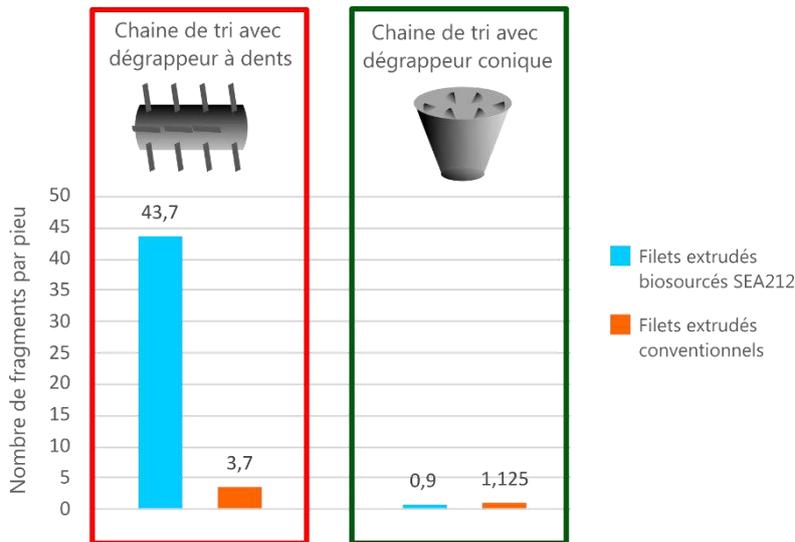


FIGURE 21 : NOMBRE DE FRAGMENTS COMPTES PAR PIEU, POUR CHAQUE TYPE DE FILET, AVEC DIFFERENTS DEGRAPPEURS



FIGURE 20 : FRAGMENTS TROUVES SOUS UNE LAVEUSE

Le protocole détaillé en II.C.1.b)(1)(d)(ii) a permis de quantifier la fragmentation de ces filets chez un mytiliculteur utilisant un dégrappeur à dents, et un mytiliculteur utilisant un dégrappeur conique.

En Figure 21, on remarque que l'on compte davantage de fragments sur la chaîne de tri utilisant le dégrappeur à dents, et c'est d'autant plus marqué avec les filets testés, extrudés en SEA212 (fragmentation multipliée par 11 par rapport aux conventionnels). Attention, le comptage a été réalisé chez 2 mytiliculteurs uniquement. Cependant, chez les 3 professionnels utilisant des dégrappeurs à dents, la fragmentation massive des filets biosourcés extrudés a été observée et remarquée à l'œil nu.

Les fragments retrouvés sont rarement de taille supérieure à 30cm et de taille inférieure à 2,5cm (cf **Erreur ! Source du r envoi introuvable.**). Cette fragmentation est d'autant plus problématique qu'elle intervient particulièrement au niveau des laveuses.

Par exemple, dans le cas de la chaîne de tri à terre avec dégrappeur à dents, 75% des fragments sont retrouvés dans les bacs de rejets situés sous la laveuse espagnole et la laveuse à brosse. Ces mêmes bacs contiennent des rejets de moules (trop petites, cassées) et d'autres organismes marins et sont habituellement relargués en mer. Pour les professionnels triant à bord, les rejets de laveuses ne sont

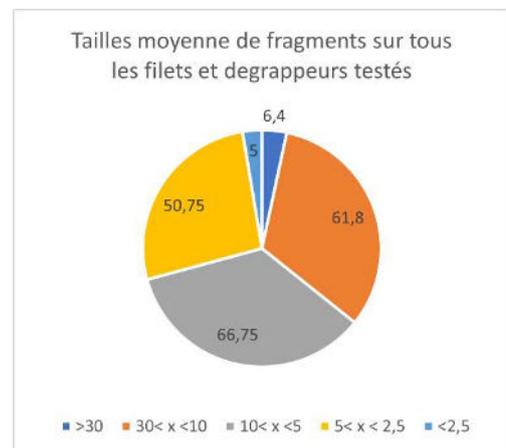


FIGURE 22 : REPARTITION DES TAILLES DE FRAGMENTS

pas récupérés en bacs, mais directement renvoyés dans l'eau de mer. Dans les 2 cas, en utilisant les filets extrudés en SEA212, les fragments émis se retrouveraient directement dans le milieu marin. Même si le matériau est biosourcé et certifié compostable en compost industriel, les conditions de compostage industriels ne sont pas atteintes dans le milieu marin et la biodégradation dans le milieu marin pourrait prendre un certain temps. Il est donc primordial de s'assurer de l'innocuité des fragments et d'étudier plus en détail son impact écotoxique dans le milieu, pour s'assurer de la pertinence environnementale de son utilisation.

b) Filets tricotés

(1) Manipulation : Découpe

Pour les professionnels déroulant la bobine à la main, aucune difficulté particulière n'a été relevée. A contrario, pour les professionnels disposant d'un système permettant de dérouler très rapidement la bobine, celle-ci avait tendance à sortir du tube autour duquel elle était enroulée (Figure 23), engendrant des paquets de nœuds. Après discussion avec le fabricant, GLYNKA avait noté des difficultés à l'embobinage et tricotage, dues au caractère glissant du matériau. Le fabricant indiquait aussi des difficultés pour le réglage des machines, mais, qui pourraient être résolues en s'habituant au matériau.



FIGURE 23 : BOBINE SORTIE DE SON TUBE AU DEROULAGE

Pour la partie nœuds aux extrémités, il était très facile de faire les nœuds.

(2) Manipulation : Pose

De plus en plus de professionnels des Pays de la Loire utilisent les filets extrudés. Seuls 3 des mytilculteurs participants ont eu, ou ont encore l'habitude de travailler avec des filets de catinage tricotés. Au moment de la pose, les non-habitués ont donc rencontré plus de difficultés, mais cela est lié aux mailles tricotées, et non au matériau. Pour les habitués, la manipulation semblait identique à la manipulation des filets tricotés conventionnels.

(3) Performance zootechnique

Les premières couches de filets ont bien tenu et ont permis le bon développement des moules. Mais pour tous les professionnels, la dernière couche a cassé, notamment à cause des mauvaises conditions météorologiques. Les ruptures des filets ont engendré une perte visible de moules (Figure 24).

Ces résultats ont été confirmés par les données de rendement. Une perte d'environ 30% a été signalée sur le secteur de l'Aiguillon, et de 15% pour le rendement mesuré sur le secteur de Bouin.



FIGURE 24 : ZONE DE RUPTURE DES FILETS TRICOTES EN PLA

(4) Pêche et tri

Aucune difficulté n'a été rencontrée au moment de la pêche et du tri, avec les filets de catinage tricotés en PLA. Les filets restent bien bloqués dans le dégrappeur. Aussi, très peu de fragments sont retrouvés dans la chaîne de tri (Figure 26), et toujours moins pour la chaîne avec le dégrappeur conique que la chaîne avec le dégrappeur à dents.

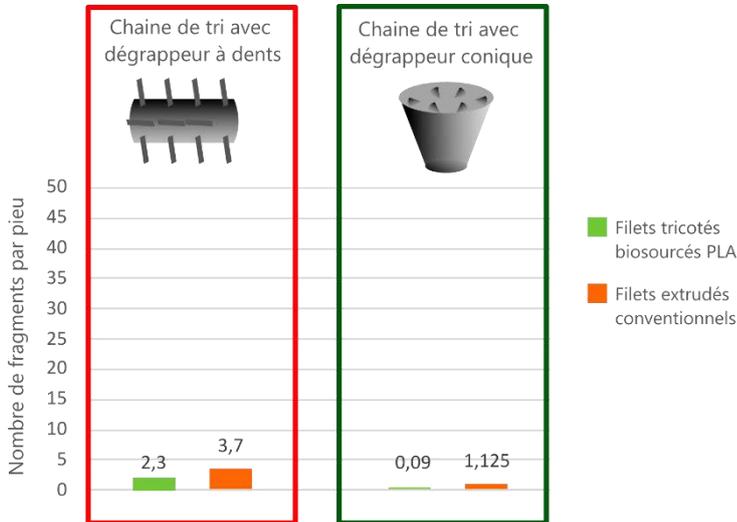


FIGURE 26 : NOMBRE DE FRAGMENTS COMPTES PAR PIEU POUR CHAQUE TYPE DE FILET AVEC DIFFERENTS DEGRAPPEURS



FIGURE 25 : FRAGMENTS TROUVE SOUS LA LAVEUSE ESPAGNOLE (CHAINE DEGRAPPEUR A DENTS)

c) Bilan/comparaison

Les 2 types de filets de catinage testés présentent des avantages et des inconvénients.

Pour les essais de filets de catinage tricotés en PLA : il faut bien prendre en considération que les conditions météorologiques étaient plus difficiles par rapport aux essais de filets extrudés en SEA212. Les filets ont présenté beaucoup de casse, engendrant une baisse de rendement. Il est donc difficile pour les professionnels d'envisager l'utilisation de ces filets.

Pour les essais de filets de catinage extrudés en SEA212 : à première vue les filets semblent plus résistants, mais ils n'ont pas pu faire leurs preuves sur une météo agitée. Aussi, la fragmentation de ses derniers dans les machines pourrait entraîner une pollution marine. C'est pourquoi il est fondamental d'obtenir les résultats d'écotoxicité sur le milieu pour conclure de l'intérêt de ces filets.

Le résumé des résultats est présenté dans le tableau ci-dessous (Tableau 3). Les résultats et commentaires sont réalisés en comparaison avec des filets conventionnels.

TABLEAU 3 : RESUME DE LA PERFORMANCE DES FILETS TESTES EN CONDITIONS REELLES

	Filets extrudés en SEA212		Filets tricotés en PLA	
	Commentaire	Note	Note	Commentaire
Manipulation : découpe	Nœuds glissants	4/5 😊	4/5 😊	Débobinage qui fait des nœuds
Manipulation : pose	Légèrement fragile	4/5 😊	5/5 😄	
Performance Zootechnique	Ok par temps calme Non approuvé en mauvaises conditions	4/5 😊	2/5 😞	Trop cassant, surtout par météo agitée. Mauvais rendement
Pêche et tri	Fragmentation, d'autant plus prononcée avec l'usage de dégrappeurs à dents	2/5 😞	5/5 😄	Filets bien piégés dans les dégrappeurs, pas de fragments

3. Résultats des essais en conditions réelles de filets à boudins de naissains

L'échec du premier essai de production des boudins avec GALLOPLASTIK et la difficulté d'approvisionnement du PLA 550 dtex ont retardé la production des filets à boudins qui a pu être achevée pour une mise en place seulement en septembre 2023. Malheureusement, les conditions météorologiques n'ont pas été favorables et ont engendré de la perte de naissain et, par conséquent, des difficultés pour garnir les pieux. Seul un des producteurs a eu la possibilité de mettre en place une 20aine de boudins extrudés. N'étant pas habitué à travailler avec du boudin extrudé, il s'est avéré compliqué pour ce producteur de comparer les performances à celles des boudins extrudés conventionnels. Néanmoins, il était plutôt satisfait, la pousse des moules lui semblant plus facile que sur les boudins tricotés qu'il utilise habituellement.

Un autre professionnel a voulu essayer ces boudins, mais ses moules passaient à travers. Il aurait fallu un maillage plus petit ou travailler avec des moules grappées entre elles (pélisse).

4. Conclusions et discussions sur les essais en conditions réelles

Tous les filets testés se manipulent et se posent facilement mais les résultats sont plus mitigés sur les performances zootechniques et la pêche.

Les filets de catinage tricotés en PLA sont trop fragiles pour répondre aux exigences des producteurs, et ont engendré une perte de rendement notable. Les filets extrudés, eux semblent plus résistants, mais les conditions météorologiques de l'année des essais étaient aussi plus calmes. Leur usage pourrait être adapté dans des secteurs peu à moyennement exposés. Néanmoins, leur importante fragmentation à l'usage des dégrappeurs à dents pose question. De nombreux micros-fragments se retrouvant dans les bacs de rejets, il était nécessaire d'étudier plus en détail leur impact sur le milieu, notamment via des analyses d'écotoxicité.

Bien que les filets à boudins aient à peine pu être testés, ils semblent, à première vue efficaces. Les analyses d'écotoxicité pourraient, en plus, à minima, justifier de l'intérêt écologique des matériaux composant ces filets à boudins.

Ces analyses ont été réalisées et les résultats sont présentés en partie F. de ce rapport.

Dans tous les cas, que les professionnels travaillent avec des filets conventionnels ou biosourcés, l'usage des dégrappeurs coniques semble plus adapté pour limiter le nombre de fragments perdus dans les rejets.

D. Etude des propriétés mécaniques et du vieillissement des filets de catinage extrudés en SEA212

Afin de comprendre l'évolution des propriétés mécaniques des filets en fonction des secteurs, des essais de tractions ont été réalisés sur les filets de catinage extrudés en SEA212 après 0 mois, 6 mois et 12 mois en mer. Une analyse similaire avait été envisagée pour les filets tricotés, mais la méthodologie des essais n'était pas adaptée à la structure « maille » des filets.

Aussi, précédemment dans FILALTIQ, des filets en taille 36/100 avaient été produits, mais étaient trop petits pour s'adapter aux engins à catiner d'un des professionnels participant aux essais. Une taille légèrement plus importante avait été commandée (36/100+) afin de répondre à ce besoin. La production de cette dimension a nécessité l'achat d'une pièce pour les extrudeuses appelée « filière »

(une sorte d'embout). Cet embout devait garantir la production du 36/100+, mais une amélioration de la qualité des filets.

Les essais mécaniques ont été réalisés pour identifier s'il existait des différences de résistance entre les différentes dimensions de filets mais aussi pour vérifier que les filets étaient bien plus résistants grâce à la nouvelle filière.

1. Méthodologie

a) Protocole

L'essai mécanique de traction est un test fréquemment utilisé en vue de définir le comportement mécanique d'un matériau. À l'aide de celui-ci, il est possible de déterminer le comportement élastique et la résistance à la rupture d'un échantillon, et ce dans un état de contrainte uni-axiale. Cette expérience consiste à positionner un échantillon d'un matériau à étudier dans les mâchoires de la machine de traction, les « mors ». Puis ce dernier est contraint par une force. Le test s'arrête lorsque que le matériau est rompu. Tout au long de cet essai, l'allongement et la force appliquée sont enregistrés, et sont ensuite convertis en déformation et contrainte. Ce type d'essai est plutôt adapté à des matériaux présentés sous un format « éprouvette », un format normé adapté à la traction par les mors. Un protocole reproductible a été défini pour adapter cet essai avec des mailles de filets. Les mors ont été remplacés par des cylindres en forme de vis sans fin permettant d'accrocher une maille de filet de part et d'autre de leur longueur ou largeur. La traction a été réalisée à la fois dans l'axe radial (« en x ») et dans l'axe longitudinal (« en y ») afin de prendre en compte les différentes contraintes sollicitant le filet (poids des moules, élargissement du filet...) (Fernandes-Dias et al., 2021).



FIGURE 27 : MACHINE POUR LES ESSAIS DE TRACTION

Les essais ont été réalisés par 2 micro-entreprises étudiantes : IDESYS dans un premier temps, puis CENTRALE NANTES suite à la fermeture de la première.

b) Echantillonnage

Des échantillons de 3 dimensions ont été testés, en taille 36/95, 36/100 et 36/100+ (variation du 36/100).

Les filets ont été soumis à différents mode d'exposition/de conservation :

- Stockage un an en garage (filets issus de la production précédente) ;
- Directement sortis d'usine (filets neufs) ;
- Directement sortis d'usine puis immergés 6 mois ;
- Directement sortis d'usine puis immergés 12 mois.

Les immersions ont été réalisées sur 3 secteurs différents :

- L'Aiguillon, enroulés autour de pieux mytilicoles (zone A) ;
- En baie de Quiberon, attachés à une bouée, en permanence immergés (zone B) ;
- A Noirmoutier, enroulés autour de pieux mytilicoles (Figure 28). Cette disposition permettait de pouvoir récupérer les filets, malgré le biofouling. Le



FIGURE 28 : ECHANTILLON SUR PIEU

non-écartement des mailles pourrait sous-estimer le vieillissement des filets, mais une disposition classique aurait rendu impossible le retrait (zone C).

Une partie des filets a été récupérée après 6 mois en mer, l'autre après 12 mois.

Un filet conventionnel, stocké 1 an en garage et non immergé a été testé comme valeur de référence initiale

TABLEAU 4 : LISTE DES ECHANTILLON TESTES A LA TRACTION

Nom echantillon	Description (matériau, dimension, stockage, secteur)
CONV_100	Conventionnel, 36/100, garage 1 an
AF_95	SEA212, 36/95, garage 1 an
AF_100	SEA212, 36/100, garage 1 an
NF_95	SEA212, 36/95, sortie d'usine
NF_100+	SEA212, 36/100+, sortie d'usine
NF_95_A_6	SEA212, 36/95, 6 mois en mer, Aiguillon sur mer
NF_95_A_12	SEA212, 36/95, 12 mois en mer, Aiguillon sur mer
NF_100+_A_6	SEA212, 36/100+, 6 mois en mer, Aiguillon sur mer
NF_95_B_6	SEA212, 36/95, 6 mois en mer, Baie de Quiberon
NF_95_B_12	SEA212, 36/95, 12 mois en mer, Baie de Quiberon
NF_100+_B_6	SEA212, 36/100+, 6 mois en mer, Baie de Quiberon
NF_100+_B_12	SEA212, 36/100+, 12 mois en mer, Baie de Quiberon
NF_95_C_6	SEA212, 36/95, 6 mois en mer, Noirmoutier
NF_95_C_12	SEA212, 36/95, 12 mois en mer, Noirmoutier
NF_100+_C_6	SEA212, 36/100+, 6 mois en mer, Noirmoutier
NF_100+_C_12	SEA212, 36/100+, 12 mois en mer, Noirmoutier

2. Résultats des essais de tractions

Les résultats des mesures de force à la rupture sont toutes visibles en **Erreur ! Source du renvoi i**

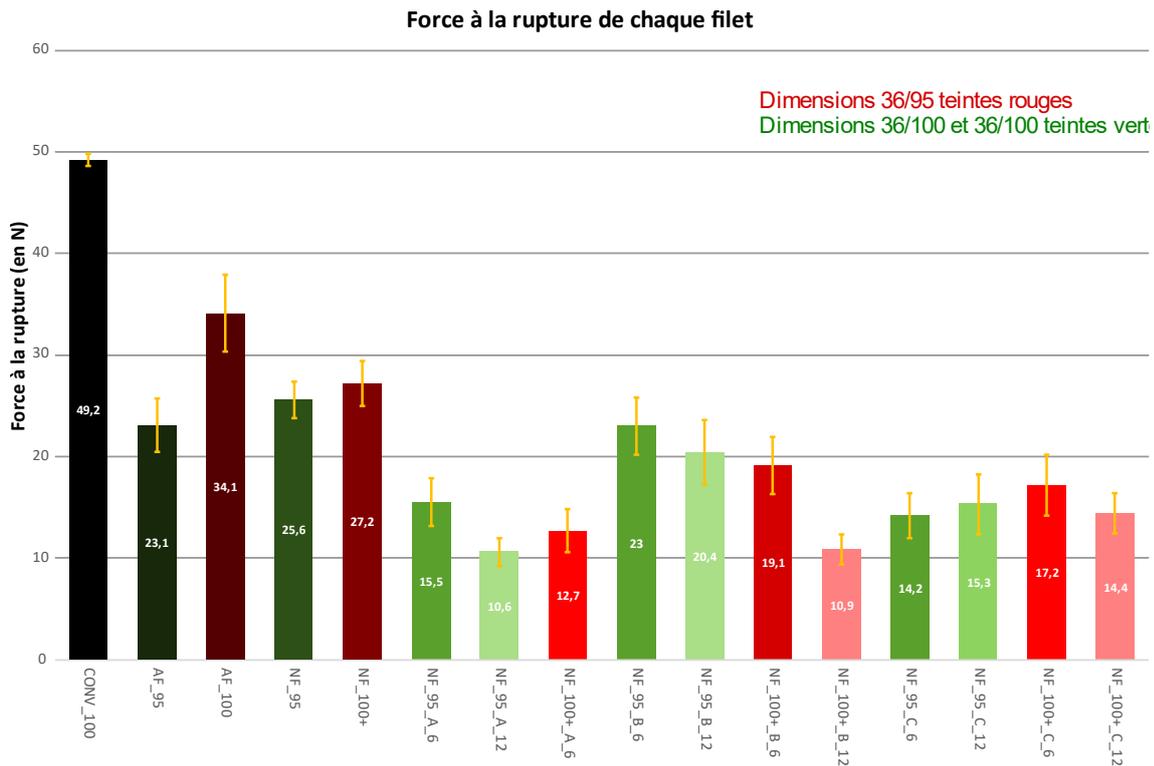
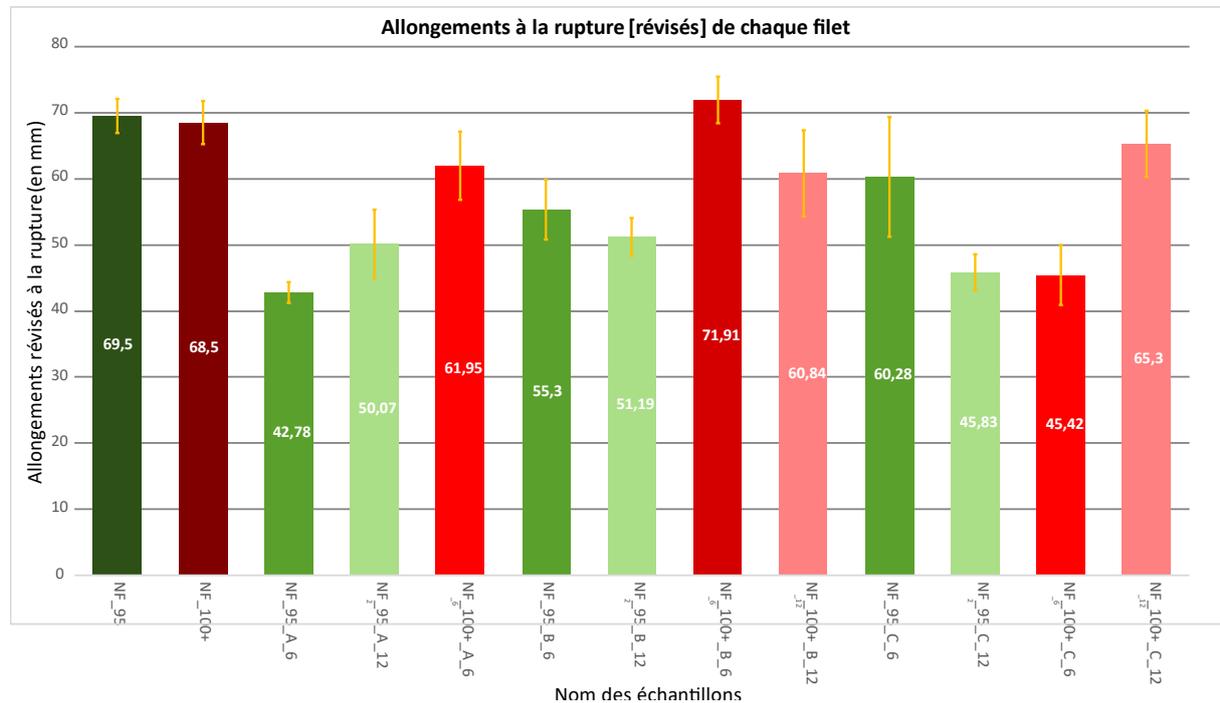


FIGURE 29 : RESULTAT DES MESURES DE FORCES A LA RUPTURE POUR TOUTS LES ECHANTILLONS

ntrouvable..



Les résultats des mesures de l'allongement à la rupture se trouvent en Figure 30. L'allongement est représentatif de la souplesse et de la capacité de déformation des filets. Il est important que le matériau des filets de catinage soit capable de s'allonger afin d'accompagner la pousse des moules.

a) Comparaison filets biosourcés/filets conventionnels

Le filet conventionnel est à minima 1,5 fois plus résistant et se déforme presque 2 fois plus que les filets en SEA212 (peu importe leur dimension). Ses points de rupture sont multiples, à divers endroits des mailles, tandis que les filets biosourcés se cassent systématiquement au niveau des nœuds latéraux.

b) Comparaison inter filets biosourcés

Quel que soit le temps d'immersion (0 mois, 6 mois ou 12 mois), aucune différence significative entre les forces de rupture n'est observable entre les filets biosourcés. Seul le filet produit avec l'ancienne filière et de taille 36/100 se démarque, avant l'immersion.

Globalement, les résultats nous montrent que pour chacun des filets, plus la durée de vieillissement en mer est grande, et plus la force à la rupture diminue. Cette diminution varie entre 5% et 30% les 6 premiers mois, et 20 et 60% après 12 mois.

L'allongement est moins impacté que la force à la rupture. Dans le pire des cas, au bout de 12 mois, les filets ont perdu 26% de leur capacité d'allongement.

Les filets vieillis en zone A et C présentent des forces à la rupture légèrement moins importantes que les filets vieillis en zone B.

Pour l'allongement, les filets en zone B semblent être sensiblement moins impactés.

La cinétique de la perte des propriétés (résistance et déformation) est très variable d'une zone à l'autre.

3. Conclusions et discussions des résultats des essais de tractions

Les filets conventionnels sont nettement plus résistants que les filets biosourcés extrudés en SEA212. Ils se déforment aussi mieux, ce qui leur permet probablement d'être plus ajustés autour des pieux, et d'accompagner plus facilement la pousse.

L'utilisation de la nouvelle filière ne semble pas avoir amélioré la résistance des filets. Les filets en taille 36/100 sont même plus résistants que les filets de taille équivalente, produits avec la nouvelle filière en 36/100+. Cette différence est estompée après vieillissement.

Les propriétés mécaniques diminuent avec l'immersion, de manière relativement rapide. Il est en effet possible de perdre 50% de résistance dès les 6 premiers mois. Cela renforce la nécessité de superposer plusieurs couches de filets pour en garder l'efficacité.

Les propriétés mécaniques sont moins affectées en zone B, c'est-à-dire quand les filets sont immergés en permanence. Le découvrage des filets à marée basse en zone A et C pourrait expliquer une perte plus rapide de résistance, probablement liée à une exposition aux UV plus importante.

Les conditions météorologiques variables entre les secteurs expliquent probablement les cinétiques variables des pertes de propriétés mécaniques.

L'ensemble des résultats des essais de tractions ont été réalisés en 2 temps, par 2 entreprises et ont fait l'objet de 2 rapports consultables en annexe 2 et annexe 3.

E. Essais de biodégradabilité des filets en composteur mécanique

1. Définition de biodégradabilité et normes

a) Définitions : bioplastique, biodégradabilité et normes

Un bioplastique est un plastique biosourcé (entièrement ou partiellement) et biodégradable ; ie qui se décompose en éléments divers sous l'action d'organismes vivants. Le caractère biodégradable s'apprécie, en matière d'environnement, en fonction du degré de décomposition, du temps nécessaire à cette décomposition et de l'effet des éléments obtenus sur les milieux¹⁰.

Pour le projet ce sont des bioplastiques biodégradables en compost industriel qui ont été ciblés. Les composts industriels atteignent des températures plus élevées (autour de 70°C) que le compost individuel. C'est pourquoi un bioplastique compostable en compost industriel, ne se dégradera pas forcément en compost ménager.

Il existe deux normes de spécifications pour la biodégradabilité des plastiques en compost industriel : NF EN 14995 et ISO 1708. Mais la norme la plus utilisée en France est la NF EN 13432, initialement prévue pour les emballages. Ces trois normes font toutes référence aux mêmes normes d'analyse et d'essais¹¹.

Une analyse de composition du matériau d'essai (permettant de vérifier la teneur en composés polluants), un essai de désintégration en compostage, une évaluation de la biodégradation et un test de phytotoxicité sont à effectuer pour prétendre à la certification. Pour les matériaux testés, le SEA212 et le PLA, ces tests ont été effectués sur des films très fins. Or, une fois extrudé ou sous forme de fil, comme utilisés dans le cadre de REIPLIC, l'épaisseur peut allonger le temps de dégradation et modifier l'aptitude à la biodégradabilité. Il est donc nécessaire de s'assurer que les filets, une fois formés, sont toujours effectivement compostables en compost industriel.

b) Objectifs et intérêts des essais de biodégradabilité en compost industriel

De premiers essais de désintégration en compostage avaient été réalisés dans le cadre du projet FILALTIQ, avec des filets neufs. Les essais se sont déroulés avec VEOLIA dans des andains industriels. Le PLA produit par SENBIS avait réussi à passer le test de désintégration mais le SEA212 et le PLA de PONSA mettaient trop de temps à se désintégrer pour passer la qualification.

Face à ces résultats, l'objectif du projet REIPLIC était de réitérer un essai en changeant quelques paramètres :

- En réalisant les essais sur des filets usagés, après 1 saison en mer en conditions réelles
- En réalisant un broyage préalable de la matière, pour voir si ce changement permettait de remplir les exigences de la réglementation
- En réalisant les essais dans des composteurs électromécaniques. Ces composteurs sont semi-industriels. L'intérêt de ces composteurs est double :
 - o Ils permettent de mieux contrôler les paramètres physico-chimiques ;
 - o Ce sont de petites unités qui pourraient être implémentées sur tout le territoire afin d'éviter une logistique de transport des déchets et de permettre une distribution équitable sur tous les secteurs de production des Pays de la Loire. C'est aussi intéressant dans le cas où les industriels resteraient réfractaires aux traitements des « bioplastiques » compostables en compost industriel. A ce jour, très peu acceptent

¹⁰ (Vocabulaire des matériaux de l'environnement, 2023)

¹¹ (ADEME, 2020)

de réellement traiter ces bioplastiques : d'une part, parce que le cadrage réglementaire reste trop peu étoffé pour assurer la compostabilité sans crainte, d'autre part parce que la décomposition des bioplastiques permet de les faire disparaître mais pas d'améliorer la valeur agronomique, mais aussi parce qu'il est difficile de distinguer les plastiques conventionnels des plastiques certifiés biodégradables en compost industriel. Dans ce sens, les politiques actuelles favorisent le recyclage pour ce type de matériau, et l'ADEME contre-indique aux composteurs industriels le compostage des bioplastiques compostables¹², d'où l'intérêt de gérer ses propres petites unités électromécaniques.

Néanmoins, plusieurs problématiques opérationnelles étaient à valider pour la mise en œuvre de ce compostage électromécanique :

- Il est nécessaire d'identifier une solution de broyage mécanisée adaptée à la structure des filets (risque d'emmêlement dans les pales des machines) ;
- Il s'agit aussi de vérifier la faisabilité mécanique de l'intégration des filets dans le composteur qui comprend un axe central muni de pâles en rotation pour l'agitation, même après broyage ;
- Les filets devront être co-compostés avec d'autres déchets (coproduits). Il convient de vérifier la proportion d'intégration des filets dans le mélange mis en compostage.
- Les températures de compostage, en composteur électromécanique, sont inférieures à celles prévues dans les normes de biodégradabilité en compostage industriel. Il convient de vérifier que la biodégradation est effective dans ces conditions.
- Les filets, après usage et pêche des moules, sont « souillés » avec des résidus marins organiques et minéraux. Il est nécessaire de vérifier leur impact sur le compostage et la qualité du compost (salinité notamment).

2. Méthodologie

a) *Collecte et préparation des filets*

Les essais de compostage ont été réalisés sur les filets de catinage extrudés en SEA212 après une saison en mer. Au moment de la pêche et après le tri, les résidus de filets captés par les dégrappeurs ont été mis de côté dans des bacs. Chaque bac a été réinspecté et trié manuellement pour ôter d'éventuels plastiques non biosourcés (élastiques mytilicoles) ou reste de boudins conventionnels. L'entreprise UPCYCLE, responsable des essais de biodégradabilité a envoyé un transporteur pour récupérer la matière chez les mytiliculteurs participant aux essais. 4 lots ont été reçus entre le mois d'août et le mois de septembre 2023, pour un volume brut total de 1 125 L de filets.

La société UPCYCLE a identifié des broyeurs capables de traiter les filets mais les prestataires n'ont pas souhaité broyer les filets souillés. Industriellement, il serait donc possible de broyer les filets en envisageant l'achat d'un broyeur adapté. Dans le cadre des essais, la découpe a donc été réalisée par Upcycle, de façon manuelle, afin de faciliter leur intégration au sein du composteur électromécanique, en évitant l'enroulement de ceux-ci autour de l'axe d'agitation.

¹² (ADEME, 2023)

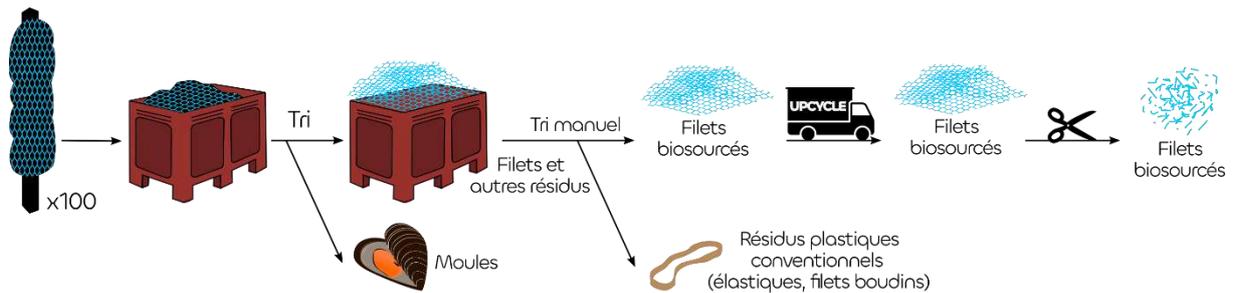


FIGURE 31 : SCHEMA DU PROTOCOLE DE COLLECTE ET PREPARATION DES FILETS POUR LE COMPOSTAGE

b) Compostage

(1) Optimisation des conditions de compostage par l'apport de co-substrats

Les plastiques biosourcés certifiés compostables en compost industriel peuvent se dégrader dans des conditions de compostage industriel, mais n'apportent pas de valeur agronomique au compost. Aussi, il serait inutile et non représentatif de composter uniquement des filets. Par ailleurs, par rapport aux conditions optimales de compostage, les filets présentent une teneur en matière sèche et un rapport carbone/azote trop élevé. Afin d'apporter les meilleures conditions de compostage, il a donc été nécessaire d'apporter un co-substrat humide et un co-substrat carboné.

Dans une logique de filière de proximité, les filets seront compostés avec deux co-substrats produits localement :

- Des biodéchets (restes de repas et de biodéchets de collectivité), qui ont une humidité élevée ;
- Des déchets verts (broyats de déchets végétaux, principalement tontes et petits branchages), qui permettent d'augmenter la quantité de carbone.

L'ensemble constitue une ration. 2 modalités de rations ont été testées dans l'optique d'intégrer le maximum de filets, tout en permettant le compostage. Les rations testées sont :

- **15%** de filets, **43%** de biodéchets et **43%** de déchets verts (lot 1)
- **23%** de filets, **39%** de biodéchets et **39%** de déchets verts (lot 2)

(2) Compostage et maturation

Le composteur électromécanique est un système de compostage *in situ* automatisé. Le composteur utilisé est le composteur électromécanique TIDY PLANET A700. Le compostage se fait en continu, ce qui signifie qu'il peut être alimenté chaque jour en produits frais et ces produits avancent jusqu'à la sortie du composteur, en étant mélangés pendant le cheminement. Les parties internes de la cuve sont légèrement chauffées et l'agitation peut être modulée et une aspiration assure le renouvellement du ciel gazeux. Des prélèvements de gaz sont réalisés dans le composteur et analysés par chromatographie en phase gazeuse (μ GC) de façon à surveiller les conditions aérobies dans le milieu.

Le compostage se déroule en 3 phases :

- 1 phase de démarrage de 2 semaines pendant laquelle le composteur estensemencé avec du compost issu d'un andain industriel de compostage de déchets végétaux de moins d'1 mois. Cette phase permet d'inoculer le composteur avec une flore bactérienne aérobie active permettant un démarrage des essais rapide. L'alimentation se fait chaque jour ouvré pendant ces 2 semaines.

- 1 phase de 4 semaines dans le composteur électromécanique. La ration n'est pas introduite d'un coup, mais continuellement durant les 2 premières semaines de cette phase. Au fur et à mesure, la matière est poussée vers la sortie. Elle atteindra la sortie après environ 2 semaines (temps de séjour) dans le composteur. Durant cette phase la teneur en oxygène, la température, l'évolution de la matière organique et de l'humidité sont suivis.
- 1 phase de maturation, où le compost de la ration, après sa sortie du composteur électromécanique, est récupéré et mis dans des bacs de maturation pendant 12 semaines.

A l'issue de ces 3 phases, le compost obtenu est analysé pour tester son adéquation avec la norme.

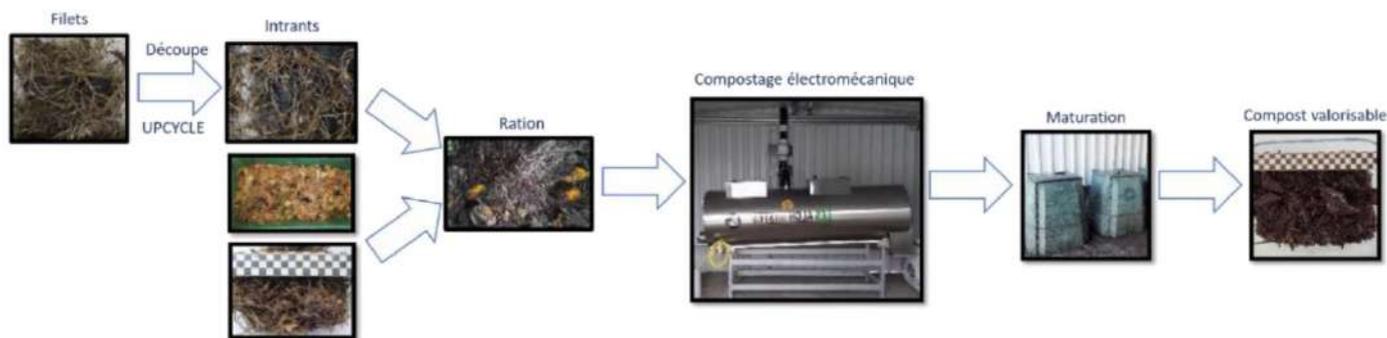


FIGURE 32 : SCHEMA DU PROCESSUS DE COMPOSTAGE

(3) Analyses du compost

Différentes analyses ont été menées pour vérifier la qualité des composts obtenus et leur adéquation avec la norme NF EN 14995, notamment :

- Analyses de désintégration des filets :
 - o Par criblage à 2mm des composts
 - o Visuellement
- Analyses de la composition biochimique :
 - o Analyse de l'innocuité
 - o Analyse des métaux
 - o Analyse des pathogènes
 - o Essais de phytotoxicité

c) Calendrier des essais de compostage

L'ensemble des étapes a été réalisé selon la chronologie suivante :

TABEAU 5 : CHRONOLOGIE DES ESSAIS DE COMPOSTAGE

	% filets	% Déchets verts	% Bio-déchets	Octobre		Novembre				Décembre					Janvier					Février				Mars				Avril				Mai									
				S42	S43	S44	S45	S46	S47	S48	S49	S50	S51	S52	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20	S21						
Démarrage	0	50	50	Lancement																																					
Ration 1	15	43	43					Composteur électromécanique				Maturation																Analyses													
Ration 2	23	39	39											Composteur électromécanique		Maturation																Analyses									

L'ensemble du protocole est consultable en annexe 4.

3. Résultats

a) Broyage et faisabilité

Lors des premières incorporations de filets au sein du composteur électromécanique, il a été observé un enroulement de ces filets autour de l'axe d'agitation, empêchant ainsi l'avancement des filets au sein du composteur. Pour résoudre le problème, UPCYCLE a procédé à une deuxième découpe plus fine, qui a permis le bon avancement de la matière dans la machine.

Par la suite, les phases de compostage se sont bien déroulées. En effet, le suivi des différents paramètres de compostage a permis de mettre en avant son bon déroulement. Notamment :

- Le suivi de l'oxygène et de la température a montré un déroulement correct du compostage
- Le suivi visuel et le suivi de la matière organique ont permis de montrer un compost en sortie de composteur qui est homogène et qui présente une bonne dégradation de la matière organique.



FIGURE 33 : FILETS ENROULES AUTOUR DE L'AXE DU COMPOSTEUR

La majeure partie de la dégradation de la matière organique (phase active de compostage) a bien eu lieu au niveau du composteur électromécanique.

b) Désintégration

La réaction de compostage s'est bien déroulée, mais à l'issue de la maturation, de nombreux fragments de filets restent visibles à l'œil nu, et d'autant plus de par la couleur blanche des filets (cf Figure 34). Les filets sont persistants, mais leur taille et épaisseur ont diminué.



FIGURE 34 : COMPOST DES 2 LOTS OBTENUS APRES MATURATION, ET EXEMPLE DE RESIDUS DE FILETS. A : PORTION 15% FILETS, B PORTION 23% FILETS

Par ailleurs, après tamisage, le taux de désintégration du lot 1 s'élève à 83% alors que pour le lot 2, le taux de désintégration n'est que de 62%.

La différence pourrait s'expliquer par le taux de filets intégré qui est différent entre les lots 1 et 2 (15% et 23% respectivement).

Précédemment, dans FILALTIQ, les essais de désintégration de filets neufs en andain industriel avaient révélé un taux de désintégration autour de 22% (pour une ration de 1% de filets et 99% de biodéchets)¹³. On constate donc que les filets, après usage en mer, se désintègrent nettement mieux que neufs. Malheureusement, quelle que soit la ration choisie, les **taux de désintégration n'atteignent pas les exigences réglementaires** (seuil de 90%).

Au vu de l'augmentation du taux de désintégration en diminuant la quantité initiale de filets, on pourrait imaginer qu'intégrer un pourcentage de filets encore plus faible pourrait être favorable à l'atteinte du seuil des 90% de la norme.

c) Qualité du compost

Pour envisager la valorisation des filets, les critères habituels des normes sont regardés pour les composts produits lors de ces essais. Les critères de la norme NF U44-051 sont considérés. Ainsi, les éléments suivants ont été mesurés : le pourcentage d'humidité, de matière sèche, matière sèche volatile, matières minérales, carbone organique, Azote Kjeldahl, Azote ammoniacal, Azote organique, Phosphore, Potassium, Calcium, Sodium Magnésium, Soufre, le pH, la conductivité, la quantité de chlorures aqueux, le rapport carbone/azote et pour finir, la quantité de métaux.

La composition biochimique des composts obtenus correspond aux standards habituels. Les deux lots de compost respectent les seuils habituels fixés par les normes relatives aux composts pour les métaux. Néanmoins, les critères de la norme NF U44-051 n'intègrent pas la salinité. Une salinité trop élevée peut causer des brûlures racinaires et des effets néfastes peuvent se manifester sur les plantes cultivées. Ces effets se traduisent par des changements morphologiques, physiologiques, biochimiques et moléculaires qui affectent négativement la croissance et la productivité végétale.

Aucun seuil de salinité pour les composts pour l'épandage n'a pu être trouvé, néanmoins des seuils pour l'eau d'irrigation ont été identifiés : celle-ci doit avoir un degré faible ou moyen de salinité, ayant une conductivité électrique de 60 à 170 mS/m.

Nos lots de composts présentent une conductivité de 124,0mS/m pour le lot 1 et de 146,0 pour le lot 2, ils présentent donc une salinité légère.

Une attention particulière devra donc être portée quant à l'épandage de ces composts dans le temps, afin de limiter la teneur en sel dans les sols, qui pourrait affecter négativement le rendement des récoltes, et provoquer une dégradation des sols et une pollution des eaux souterraines.

d) Phytotoxicité

Afin d'étudier l'innocuité des composts produits, un test de phytotoxicité a été réalisé. Ce test révèle un impact négatif des 2 lots de compost obtenus sur la germination du cresson et du blé avec un impact plus marqué pour le cresson. En effet, le cresson est connu pour être très sensible au niveau de la germination à la présence de polluants dans le sol, d'acides, d'azote.... Aussi, l'impact révélé par le test pourrait être lié à la salinité du compost obtenu. Néanmoins, les taux de salinité des composts obtenus pour le lot 1 (124mS/m) et le lot 2 (146mS/m) restent en deçà des taux de phytotoxicité pour le cresson considérés dans la littérature, soit 245mS/m (Sesay et al. 1997¹⁴) et 400 mS/m (Garcia et al, 1992¹⁵).

¹³ (Julie Maheut, SMIDAP, 2020-2021)

¹⁴ (Sesay AA, 1997)

¹⁵ (Garcia, 1992)

Par ailleurs, on constate que pour le lot 1 (15% de filets), la germination est plus impactée. Cela pourrait être expliqué par le fait que les filets se sont davantage dégradés et ont ainsi généré un apport plus important de fragments de filets, qui pourrait être néfaste à la germination.

Il n'est pas possible à ce stade de valider ou d'invalider l'une ou l'autre des hypothèses et de statuer précisément sur la cause d'une baisse de la germination.

e) *Innocuité microbiologique*

Les critères microbiologiques ne sont pas respectés dans les composts pour les deux lots. Des quantités trop importantes d'*Escherichia coli* et d'entérocoques ont été relevées. Il est possible que des conditions de température plus élevées pourraient permettre un abattement plus important des pathogènes. Le temps de séjour, à ces températures élevées, dans le composteur électromécanique peut être un point clé dans l'hygiénisation du compost.

4. Conclusions générales sur le compostage en composteur électromécanique, préconisations et mises en garde

TABLEAU 6 : RESUME RESULTATS COMPOSTAGE

Critère testé	Lot 1 (15%)	Lot 2 (23%)
Désintégration	✗	✗
Composition biochimique	✓	✓
Métaux	✓	✓
Paramètres microbiologiques (agents pathogènes)	✗	✗
Phytotoxicité	✗	✗

Finalement les essais de compostage en composteurs électromécanique avec des lots comprenant 15% et 23% de filets usagés n'ont pas permis d'atteindre les exigences réglementaires en termes de compostage. Le compost obtenu n'est pas assez dégradé, pas hygiénisé et entrave la germination des plantes testées. Les essais réalisés n'ont ainsi permis d'identifier une méthode de compostage des filets mytilicoles en matériau biosourcé, et ce, malgré la certification.

Les composteurs électromécaniques semi-industriels ne permettent pas d'atteindre les températures nécessaires à l'hygiénisation du compost (élimination des agents pathogènes). Pour composter des filets mytilicoles, il serait préférable de le faire en composteur industriel où les températures atteintes sont plus élevées. Néanmoins, sur le territoire français, plusieurs composteurs industriels ont été contactés mais ne souhaitent pas travailler avec ce type de matériaux. Deux raisons ont principalement été citées : les difficultés techniques de reconnaissance entre le biosourcé biodégradable et les autres plastiques, et le fait que l'ADEME ne recommande pas le compostage de ces matériaux.

Par ailleurs, le matériau SEA212, bien que certifié sous forme de film, ne se désintègre pas assez une fois sous forme de filets. Un travail est donc nécessaire pour favoriser sa biodégradation tout en ne compromettant pas sa résistance.

Enfin, les ratios de filets testés (15% et 23%) sont trop importants : de plus petits ratios permettraient de réduire la salinité du compost obtenu. Mais il faudrait prévoir une quantité plus importante de biodéchets et déchets verts. Cependant, les résultats obtenus ne permettant pas de certifier que la salinité est responsable de la phytotoxicité du compost obtenu, il faudrait, malgré tout, apporter une vigilance particulière sur les effets de la biodégradation des filets sur les plantes.

L'ensemble détaillé des résultats de l'étude de compostage se trouve en annexe 4.

Pour anticiper ces résultats, les professionnels ont été interrogés au cours du projet pour savoir s'ils seraient tout de même intéressés par les filets biosourcés si les résultats de compostage étaient

mauvais. Les producteurs s'accordaient à dire qu'ils pourraient toujours être intéressés s'avéraient moins polluants dans le milieu.

Aussi, au vu de la non-conformité des filets aux exigences de compostage, l'étude initialement prévue pour définir la faisabilité technico-économique de la mise en place d'un réseau de compostage a été abandonnée au profit d'études plus approfondies sur la pollution des matériaux testés sur le milieu.

F. Evaluation de l'écotoxicité des filets biosourcés dans le milieu marin

Les filets de mytiliculture sont au contact direct avec le milieu marin et les moules. Les matériaux utilisés se doivent d'être le plus neutres possible, afin :

- De ne pas entraver le fonctionnement biologique des moules ;
- De ne pas rendre les moules impropres à la consommation (par migration de composés toxiques par exemple) ;
- De ne pas contribuer à la pollution marine.

Avant de proposer l'utilisation généralisée de matériaux innovants pour les filets mytilicoles, il est donc nécessaire de vérifier le comportement de ces matériaux dans le milieu. Par ailleurs, comme aucune solution de compostage n'a été identifiée pour les filets biosourcés testés, ces filets resteraient intéressants uniquement si leur impact sur l'environnement marin était moindre par rapport aux filets conventionnels. De plus, vu la fragmentation importante des filets en SEA212 au moment de la pêche, il est d'autant plus crucial de vérifier que les fragments produits par ce matériau ne sont pas néfastes sur le milieu.

Des analyses d'écotoxicité peuvent rendre compte de l'impact de l'exposition à certains matériaux sur des organismes vivants. C'est pourquoi, dans le cadre de REIPLIC, deux types d'analyses ont été réalisées : des analyses d'écotoxicité aiguë et des analyses d'écotoxicité chronique.

1. Distinction écotoxicité aiguë et chronique

Les analyses d'écotoxicité servent à mesurer la réponse d'organismes face à l'exposition à une substance. Les analyses d'écotoxicité aiguës et chronique se distinguent selon la durée d'exposition et la concentration de la substance. Pour l'écotoxicité aiguë, les organismes sont exposés à une forte dose pendant un temps court, à contrario, pour l'écotoxicité chronique, les organismes sont exposés à une faible dose pendant un temps long. La concentration d'essai pour l'écotoxicité chronique est plus faible mais plus représentative des concentrations retrouvées dans l'environnement (actuelles et futures). Par ailleurs, la longévité de l'exposition peut entraîner des altérations biologiques non détectables dans un test aigu. Cependant, ces études chroniques sont aussi plus longues, et nettement plus coûteuses.

Dans tous les cas, ces analyses peuvent être faites sur une multitude d'organismes. Mais elles sont essentiellement réalisées sur les espèces dites bioindicatrices ; c'est-à-dire des espèces représentatives de la biodiversité au sens large, qui sont réactives aux pollutions et qui agissent comme une alerte précoce sur le changement de certaines conditions environnementales ¹⁶ (Butler, Freckleton, Renwick, & Norris, 2012). Elles communiquent donc des informations sur la santé de l'écosystème où elles vivent. De plus, elles doivent être sédentaires, présentes en abondance, d'une taille suffisante pour être manipulées, leur biologie doit être connue, et elles doivent présenter une réponse évidente à un stress toxique dans un délai relativement rapide¹⁷.

¹⁶ (Butler, Freckleton, Renwick, & Norris, 2012)

¹⁷ (Ramade, 1992)

Parmi ces espèces, les échinodermes ont démontré un intérêt certain en écotoxicologie depuis des années, car ils rassemblent tous les critères exposés ci-dessus.

2. Analyses d'écotoxicité aigüe

a) Objectifs

De premières analyses d'écotoxicité avaient déjà été réalisées lors du projet BIOFILET, en lien avec une pré étude sur les plastiques conchylicoles du SMEL. Ces analyses avaient été menées sur un filet biosourcé produit par INTERMAS. Cette étude avait permis de valider un protocole intéressant d'écotoxicité sur les larves d'oursins¹⁸.

Dans le cadre de REIPLIC, l'objectif était d'évaluer l'impact potentiel des matériaux PLA et SEA212 utilisés pour la production des filets mytilicoles sur le milieu, en comparaison avec les matériaux conventionnels. L'analyse d'écotoxicité aigüe avait été choisie car moins couteuse et déjà réalisée précédemment dans le projet BIOFILET sur d'autres filets.

Le SMEL a donc été sollicité pour réaliser ces analyses.

b) Méthodologie

(1) Protocole simplifié

Les larves d'oursin violet *Paracentrotus lividus* utilisées sont issues de géniteurs élevés au SMEL (Synergie Mer et Littoral) à Blainville-sur-Mer (50, Manche) dont le conditionnement est réalisé selon la méthode de standardisation de Pétinay et al., 2009.¹⁹

Chaque échantillon de filet testé a été découpé et pesé afin d'avoir la même quantité de matière dans chaque bouteille (5g ($\pm 0,2$)). Les matériaux ont été immergés dans des bouteilles en verre avec 0,90L d'eau de mer, pendant 45 jours. A l'issue des 45 jours de balnéation, les échantillons d'eau, appelés lixiviats, ont été prélevés.

Environ 300 ovocytes fécondés sont disposés dans 5mL de lixiviat de chaque échantillon à tester. L'ensemble est laissé pendant 72 heures dans une pièce à 18°C pour que les larves se développent jusqu'au stade pluteus.

A l'issue de cette période d'incubation, les larves ont été fixées au formaldéhyde (200µL pour 5mL, soit une concentration finale de 0,75%) afin de stopper leur développement.

Sur 100 larves observées par échantillon, ont été évalués :

- Le taux de larves non-développées (œuf fécondé, blastula, gastrula).
- Le taux de malformation (au stade échinopluteus).

Sur 15 larves observées par échantillon, sont mesurées :

- Les longueurs de spicules ($\pm 1C95$).



FIGURE 35 : PHOTO DE L'INSTALLATION POUR LA PRODUCTION DES LIXIVIATS A PARTIR DES ECHANTILLONS

¹⁸ (Hégron, 2019)

¹⁹ (Pétinay S., 2009)

Les séries d'échantillons ont été validées par un contrôle négatif, ici une eau de mer (EDM) et un contrôle positif au cuivre (10µgCu/L ; 50µgCu/L ; 70µgCu/L ; 90µgCu/L).



FIGURE 36 : DE GAUCHE A DROITE : LARVES BIEN FORMEES ; LARVES MALFORMEES ; LARVES NON DEVELOPPEES

(2) Echantillons testés

TABEAU 7 : LISTE DES ECHANTILLONS ET COMPOSITION

Code échantillon	Identification - Provenance	Composition
CONV17/50	Filet catinage conventionnel 17/50 (INTERMAS)	Polyéthylène (PE)
C	Filet catinage conventionnel (LAQTENE)	Polyéthylène (PE) (98,46%)
I	Filet catinage ECOVIO (INTERMAS)	PBAT/PLA (94,8%)
A212	Filet catinage extrudé en SEA212 (SEABIRD) stocké 1 an en garage	SEA212
N212	Filet catinage extrudé en SEA212 (SEABIRD) neuf sorti d'usine	SEA212
PLA	Filet de catinage tricoté en PLA (SENBIS)	PLA (100%)
GLYNKA	Filet de catinage tricoté en PE (GLYNKA)	Polyéthylène (PE) (100%)

7 échantillons de filets de catinage ont été testés. Dans ce protocole, vu la découpe et l'infusion des filets, peu importe qu'il s'agisse de filet à boudins ou de catinage, c'est l'écotoxicité des matériaux qui est contrôlée. Les échantillons en vert (Tableau 7) correspondent aux échantillons de filets de catinage en matériaux biosourcés et biodégradables en compost industriel, testés en conditions réelles dans le cadre de REIPLIC. Pour les filets en SEA212, 2 échantillons ont été testés : 1 échantillon de filet produit l'année passée et stocké 1 an en garage, et 1 échantillon de filet tout juste sorti d'usine, pour observer si le stockage a un impact sur l'écotoxicité des matériaux.

Les essais ont été réalisés en deux temps :

- Les filets extrudés conventionnels (Conv17/50 et C) et biosourcés (I, A212 et N212)
- Les filets tricotés (produits à postériori) conventionnel (GLYNKA) et biosourcé (PLA).

c) Résultats des analyses d'écotoxicité aigüe

Tout d'abord, comme les deux expérimentations entre filets de catinage extrudés et tricotés ont été réalisées séparément, il est impossible de comparer ces résultats, trop de paramètres ayant changé. En premier lieu les larves ne sont pas issues des mêmes géniteurs, le patrimoine génétique n'est donc pas comparable. Enfin, la qualité d'une eau de mer évoluant très rapidement, les lixiviats n'auront pas été soumis aux mêmes paramètres physico-chimiques, ce qui rend la comparaison d'autant plus difficile. Les discussions des résultats d'écotoxicité des filets de catinage extrudés et de catinage tricotés sont donc présentées séparément.

(1) Résultats d'écotoxicité aigüe des matériaux des filets extrudés

Globalement les résultats obtenus présentent une grande variabilité entre eux et le nombre de valeurs récoltées peut ne pas être suffisant pour assurer une bonne robustesse du jeu de données. De plus, certaines valeurs aberrantes ont dû être retirées de la base de données. Lors de l'observation, certaines boîtes ne contenaient pas de larves, une erreur de manipulation peut en être la cause. Le jeu de données est donc utilisable mais peut présenter une certaine faiblesse statistique qui doit être prise en compte dans l'analyse, et il serait intéressant de renouveler cette expérimentation avec un nombre de réplicats plus élevé.

Néanmoins, il semblerait que pour cette expérimentation, parmi les lixiviats de filets extrudés, seul l'échantillon de filet en SEA212 neuf sorti d'usine ai montré un impact significatif sur la survie et le développement des larves. Ceci s'explique probablement par la présence d'additifs et de résidus de fabrication qui n'ont pas eu le temps de se désorber contrairement à l'échantillon stocké un an en garage. D'après Carli (2021)²⁰, il semble que la toxicité des lixiviats issus de matériaux neufs soit liée aux additifs utilisés à la production, et que celle des matériaux usagés soit liée aux contaminants environnementaux adsorbés par les matériaux (Carli, 2021).

(2) Résultats d'écotoxicité aigüe des matériaux des filets tricotés

Il est difficile de conclure sur cette l'analyse de l'écotoxicité aigüe des filets tricotés (PLA et conventionnel). En effet les résultats du témoin d'eau de mer de référence présentent un taux de malformations assez élevé (37%). Toutefois, les résultats des deux échantillons testés semblent indiquer une toxicité pour les organismes, en revanche la cause n'en est pas établie. Il serait intéressant d'approfondir les tests en modifiant quelques paramètres, tel qu'inclure une filtration de l'eau testée avant mise en contact avec les organismes.

d) Conclusions et discussions des analyses d'écotoxicité aigüe

Vu la faiblesse statistique des résultats, il est difficile de conclure sur l'écotoxicité aigüe des matériaux testés. Par ailleurs, de tels tests ne rendent pas compte de l'exposition réelle dans le milieu marin. Les analyses d'écotoxicité aigüe sont plus adaptées pour définir des seuils à partir desquels les substances deviennent toxiques, et sont notamment beaucoup utilisées sur les polluants.

Néanmoins, il semblerait que le stockage préalable des filets neufs serait à privilégier pour limiter la concentration de polluants relargués dans le milieu.

Malgré tout, ces résultats ne sont pas suffisants pour valider que les matériaux testés sont moins impactants que les matériaux conventionnels. Or cette vérification est primordiale pour justifier l'intérêt des filets en PLA et SEA212.

L'ensemble des résultats des analyses d'écotoxicité aigüe est disponible en annexe 5.

3. Analyses d'écotoxicité chronique

a) Objectifs

Comme les professionnels avaient confirmé leur intérêt pour les filets si l'on pouvait justifier d'un impact moindre, il a été décidé d'approfondir les analyses d'écotoxicité en évaluant l'écotoxicité chronique des matériaux. Bien que longues et chères, ces analyses sont bien plus représentatives des impacts sur le milieu. Et ce d'autant plus qu'il est possible de choisir *Mytilus galloprovincialis* comme

²⁰ (Carli)

espèce bioindicatrice. L'objectif étant donc de confirmer ou non l'hypothèse que les matériaux biosourcés testés (PLA et SEA212) sont moins impactants que les matériaux conventionnels.

b) Méthodologie

(1) Protocole simplifié

La société Plastic@sea a été sollicitée par le SMIDAP pour la réalisation des analyses chroniques. Cette société a une expertise reconnue internationalement dans l'évaluation des niveaux de pollution plastique dans l'environnement, de leurs impacts sur plusieurs espèces sentinelles représentatives des écosystèmes marins et notamment sur la moule commune du genre *Mytilus galloprovincialis*. Cette dernière a été choisie dans le cadre de cette étude, car en plus d'être l'espèce voisine de l'espèce cultivée (*Mytilus edulis*) avec les filets testés, elle est déjà utilisée comme espèce sentinelle dans l'étude de contamination chimique en milieu côtier dans différents réseaux de surveillance (Mussel watch, ROCCH, RINBIO). Ces bivalves présentent des caractéristiques qui en font de bons bioindicateurs en raison de : leur large répartition géographique allant des régions tempérées aux régions subarctiques ; leur mode de vie sessile et euryhalin ; la stabilité de leur population ; leur tolérance à différents stress ; ou encore leur consommation par l'homme faisant d'elles un maillon de notre chaîne alimentaire.

20 g de chaque échantillon ont été micronisés à l'aide d'un broyeur puis tamisées à 500µm. Pour chaque matière, les particules d'une taille inférieure à 500 µm ont été déposées dans un tube en verre auquel a été ajouté 20mL d'éthanol pur. La solution a ensuite été laissée à décanter pendant 30 minutes et le surnageant, contenant les plus petites particules, a été récupéré. Les particules ont été dénombrées et mesurées à l'aide du logiciel « imageJ ». Le surnageant a ensuite été dilué pour obtenir une concentration de l'ordre de 1000 particules / L, d'une taille comprise entre 4 et 25 µm.

Les moules ont été exposées dans des aquariums alimentés en continu en eau de mer, à 5 fois la dose environnementale (200 particules/ L) au cours des 100 jours d'expérimentation afin de maximiser les effets potentiels des différentes matières sur les organismes marins.

A l'issue des 100 jours, ont été analysés statistiquement :

- Le taux de croissance des coquilles de moules exposées dans les différentes conditions ;
- La bioaccumulation des différents types de plastiques dans les tissus de moules par microscopie ;
- Les réserves énergétiques en lipides totaux des moules ;
- Les réserves énergétiques en protéines totales des moules ;
- La quantité de protéines de stress HSP70.

(2) Echantillons testés

TABEAU 8 : ECHANTILLONS TESTES DANS LES ANALYSES D'ECOTOXICITE CHRONIQUE

Code Echantillon	Identification – Provenance	Composition
Cat-ex-conv	Filet catinage extrudé conventionnel (INTERMAS)	Polyéthylène (PE)
Cat-ex-bio	Filet de catinage extrudé SEA212(SEABIRD) neuf	SEA 212
Boud-tri-bio	Filets à boudins tricoté en PLA (POLISILK) et coton (GLYNKA)	PLA + coton
Boud-tri-conv	Filets à boudins tricotés conventionnel – PP + coton (GLYNKA)	PP + coton

4 échantillons ont été analysés. Comme au moment des analyses les filets à boudins avaient été produits, ils ont pu y être incorporés pour aussi prendre en compte l'impact du coton.

La cellulose grade 42 a été utilisée comme contrôle négatif car il a été démontré que les moules sont capables de l'ingérer sans répercussion sur leur physiologie à long terme.

Dans le Tableau 8, les filets biosourcés testés dans le cadre de REIPLIC sont identifiés en vert, les autres étant des filets « témoins ».

c) Résultats des analyses d'écotoxicité chronique

Dans le cadre de cette étude, il a été démontré que la moule *M. galloprovincialis* a la capacité de bioaccumuler sur 4 mois des particules de même taille issues des quatre différentes matières testées, ne suggérant pas de sélectivité de l'espèce à l'égard des différents types de matières.

Les potentiels effets biologiques testés chez la moule en réponse à ces expositions, étaient ceux pouvant être liés à des effets physiques (dûs à l'abrasion), biologiques et chimiques (dûs à l'ingestion et à l'incorporation dans les tissus). Pour autant, malgré la bioaccumulation des particules dans les tissus, peu d'effets ont été observés sur la biologie des organismes après une exposition sur 100 jours à une concentration 5 fois supérieure à la concentration environnementale classiquement utilisée. L'absence d'effet observé à l'échelle de l'organisme sur les paramètres biologiques de la moule soumise aux différentes matières durant 100 jours indique l'innocuité de ces matières dans la concentration du test sur le modèle moule marine. En effet, ni les composantes énergétiques ni la croissance des coquilles n'ont été altérées par rapport à la condition contrôle.

Seule une différence significative a été observée au niveau de la quantité de protéines de stress totales entre la matière du filet conventionnel et les matières biosourcées (PLA et SEA212). Dans les concentrations testées, le PE stresserait davantage les moules que les matières biosourcées. Néanmoins, ces analyses préliminaires devraient être validées par test ELISA (test conçu pour la détection d'antigènes ou d'anticorps) pour conforter ce point.

Les résultats de bioaccumulation couplés aux mesures biologiques permettent de conclure sur la capacité des moules à s'acclimater aux microparticules et à maintenir leurs fonctions physiologiques essentielles (métabolisme) et secondaires (croissance) en présence des particules testées. Ainsi, un environnement marin contenant une concentration de particules de ces matières proche de celles des essais n'impacterait pas le bon développement des moules.

L'ensemble des résultats de l'analyses d'écotoxicité chronique se trouvent en annexe 6.

4. Conclusions générales sur l'écotoxicité des matériaux PLA et SEA212

Finalement, l'impact des matières biosourcées testées n'est pas nettement démarqué des matières conventionnelles, ni des témoins. Elles pourraient induire légèrement moins de stress que les matières conventionnelles, mais toujours plus de stress qu'en contact avec une matière inerte comme la cellulose.

Ces observations sont plutôt rassurantes vis-à-vis de l'ensemble des matériaux, qui ne sembleraient pas impacter considérablement le milieu, au moins dans les 100 premiers jours d'utilisation, dans les concentrations testées.

Enfin, un stockage des filets quelques temps après réception, à l'abri des UVs pourrait permettre de limiter l'impact des additifs de production dans la mer.

G. Impact économique du passage aux filets biosourcés pour les mytiliculteurs

Initialement, une étude économique approfondie avait été prévue dans le projet. Cette étude intégrait des enquêtes individuelles auprès de tous les professionnels pour mieux cerner leurs pratiques (quantités utilisées, marques, coûts globaux par rapport au reste de l'activité, etc...) et la typologie des entreprises concernées. Elle intégrait aussi l'analyse de la propension à payer des professionnels pour des filets biosourcés.

Vu le budget d'une telle étude, il a été souhaité d'attendre les résultats des essais en conditions réelles et du compostage pour déterminer si une enquête d'une telle ampleur était nécessaire. Aussi, étant donné la fragilité des filets tricotés en PLA, la fragmentation des filets en SEA212 lors de la pêche et la non-conformité aux normes de compostage, il n'a pas été souhaité de réaliser cette étude. Cette décision a été prise à l'unanimité en comité de pilotage (COPIL).

Néanmoins, il est possible de comparer les tarifs des différents matériaux et d'avoir un aperçu de l'augmentation du prix des filets induite par l'utilisation de matières biosourcées. Les tarifs sont donnés dans le Tableau 9. Les dates diffèrent (dépendance aux données disponibles) mais permettent d'obtenir un ordre de grandeur.

TABLEAU 9 : TARIFS DE DIFFERENTS MATERIAUX POUR LA PRODUCTION DE FILETS MYTILICOLES

Type de filet	Matériau	Prix à l'achat du matériau /kg
Catinage tricoté conventionnel	Polypropylène (PP)	2,15€
Catinage tricoté biosourcé	PLA	15,75€ (janv 2023)
Filet à boudins tricoté conventionnel	Polypropylène (PP)	3,00€
Filet à boudins tricoté biosourcé	PLA	9,82€
Catinage extrudé biosourcé	SEA212	9,68€ (Mars 2024)
Catinage conventionnel extrudé	PE	Prix du PE non communiqué, son tarif pourrait avoisiner celui du PP

En considérant un temps de fabrication identique, et en se basant sur les coûts de production de Glynka et sur les tarifs du tableau précédent :

- La production de 1km de filet de catinage tricoté biosourcé coûterait 3 fois plus cher (+300%) que les filets conventionnels ;
- La production de 1km de filets à boudins tricotés biosourcés serait moins impactée et ne coûterait « que » 13% de plus. Ceci est lié aux coûts de main d'œuvre plus élevés et à une proportion moindre de matériaux biosourcés, vu que la moitié du filet est aussi composée de coton.

En considérant un temps de fabrication identique pour les filets biosourcés et conventionnels, en se basant sur les coûts de production de Galloplastik, en tenant compte des tarifs du tableau précédent, et en considérant que le coût du PE est égal à celui du PP :

- La production de 1km de filets (catinage ou boudins) extrudé biosourcé coûterait 30% plus cher que les filets conventionnels. Dans cette estimation, le pourcentage de perte de matière plus important pour la production de filets biosourcés a été pris en compte ;

Les données de la coopérative de Challans permettent d'estimer qu'en moyenne, les producteurs de cette zone achètent entre 20 et 25km de filets de catinage par an et 13km de filets à boudins par an. En considérant les données précédentes on pourrait envisager un surcoût annuel de l'ordre de 3 000 à 5 700 € en se basant sur les quantités achetées par les producteurs de cette zone.

H. Conclusions générales sur les essais de filets mytilicoles

Les filets testés s'avèrent plus fragiles et moins performants que les filets conventionnels. L'utilisation des filets en PLA a notamment entraîné des pertes notables de rendement, ce qui n'a pas été le cas avec les filets Sea212. Ces derniers ont mieux résisté, mais ont été soumis à des conditions météorologiques plus clémentes que les filets tricotés. Néanmoins, la moindre résistance des filets en SEA212 par rapport aux filets conventionnels pourrait engendrer une diminution du rendement dans d'autres conditions météorologiques que celles de l'expérimentation. Elle pourrait aussi être à l'origine d'une émission importante de fragments au moment de la pêche, surtout avec l'utilisation de dégrappeurs à dents.

Par ailleurs, les résultats d'écotoxicité ne permettent pas de mettre en évidence une importante différence d'impact sur le milieu entre les matériaux conventionnels et ceux biosourcés testés.

En plus de ces observations, les filets en matériaux biosourcés ne répondent pas aux normes de compostage industriel et ne sont donc pas valorisables en fin de vie. Leur utilisation ne résoudrait donc pas la problématique actuelle de gestion des filets conventionnels usagés.

Enfin, le prix des filets produits en matériaux biosourcés est plus élevé que celui des filets conventionnels.

Les filets testés n'ont donc pas démontré d'avantages environnementaux ou économiques nets par rapport aux filets conventionnels.

Ces résultats confirment l'intérêt d'analyser en détail l'ensemble des paramètres physiques, chimiques, techniques et économiques lors de l'expérimentation de nouveaux matériaux, afin de s'assurer de la pertinence de leur utilisation.

L'amélioration de la résistance et de la compostabilité des matériaux en vue de la production de filets mytilicoles nécessiterait à nouveau plusieurs années de recherche et développement avant l'obtention d'un produit performant, économiquement et environnementalement viable.

Aussi, la création d'un procédé permettant de nettoyer les filets conventionnels en utilisant le moins d'eau possible et de les catégoriser par matériaux en vue de leur recyclage serait une piste à explorer de façon plus approfondie.

L'activité mytilicole est déjà une activité à très faible impact sur le milieu. Pour limiter l'impact des filets conventionnels en attendant qu'une option plus respectueuse de l'environnement voit le jour, quelques préconisations pourraient être appliquées par les mytiliculteurs, dans la mesure du possible.

A savoir :

- De minimiser le nombre de couches de filets de catinage utilisées ;
- De favoriser l'utilisation de filets tricotés, présentant moins de risques de fragmentation ;
- De favoriser l'utilisation de dégrappeurs coniques, limitant aussi le risque de fragmentation.

III. Alternatives aux conditionnements

A. Contexte général et réglementaire

Les conchyliculteurs utilisent des emballages afin de vendre leurs coquillages tout en respectant les exigences sanitaires. Actuellement, la plupart de ses emballages ne sont pas, ou peu réutilisés ni recyclés.

D'un point de vue réglementaire, ces emballages sont considérés comme des déchets produits par les conchyliculteurs. Or, selon le **code de l'environnement**, tout producteur ou détenteur de déchets est responsable de la gestion de ses déchets jusqu'à leur élimination ou valorisation finale, même lorsque le déchet est transféré à des fins de traitement à un tiers. C'est-à-dire que les entreprises conchyloles sont tenues de gérer les déchets (emballages/conditionnements) qu'elles mettent en marché et de s'assurer que leur élimination soit conforme à la réglementation.

L'idéal étant de ne pas produire le déchet initialement. Malheureusement, pour des raisons pratiques et d'hygiène, il peut être difficile de se passer de conditionnement, d'autant plus pour des denrées animales et humides. Il faut alors hiérarchiquement favoriser d'abord le réemploi, si ce n'est pas possible, la valorisation de la matière, puis la valorisation énergétique plutôt que l'enfouissement (hiérarchie des modes de traitement du code de l'environnement²¹).

Par ailleurs, pour financer le traitement des emballages mis sur le marché, les producteurs sont tenus de payer une **écocontribution** auprès d'un organisme certifié (CITEO/LEKO). En 2024, pour les entreprises qui commercialisent moins de 10 000 UVC par an, le forfait de base minimal est tarifé à 55€ (LEKO) et 80€ (CITEO). Au-delà des 10 000 UVC, la tarification est payée par unité, et selon un barème défini par chacun des organismes. Des décotes tarifaires sont appliquées pour les emballages recyclables et/ou contenant des matériaux recyclés.

Depuis la **loi Anti-Gaspillage pour l'Economie Circulaire (AGEC)** promulguée le 10 février 2020, la réglementation ne cesse de se durcir pour réduire la quantité de déchets. Cette loi nationale imposera notamment, à partir du 1^{er} janvier 2025, le paiement d'une éco-contribution pour les déchets professionnels (palettes, films etc...).

Cette loi française qui a pour objectifs de sortir du plastique jetable ; mieux informer les consommateurs ; lutter contre le gaspillage et pour le réemploi solidaire ; agir contre l'obsolescence programmée et mieux produire, pourrait être tout ou en partie, remise en cause par le projet de règlement européen sur les emballages, « PPWR », pour « Proposal Packaging and Packaging Waste Regulation ». En effet, cette réglementation PPWR a pour volonté d'unifier les pratiques de gestion d'emballages au sein de l'UE. Elle est en cours de discussion mais favoriserait le réemploi, le recyclage et l'intégration de matière recyclée.

A ces réglementations s'ajoute la loi Climat et résilience n°2021-1104 qui cible les polystyrènes. Si bien que d'ici le 1^{er} janvier 2025, s'il n'existe pas de filière de recyclage des polystyrènes, ces derniers seront interdits²².

Dans ce contexte, en ayant conscience des enjeux environnementaux, les producteurs ont souhaité agir pour faire évoluer leurs emballages. Pour cela, dans le projet FILALTIQ, deux enquêtes avaient été réalisées pour identifier les principaux conditionnements utilisés en conchyliculture. Ces enquêtes ont été complétées par un travail bibliographique afin de proposer un plan d'actions à mener pour le

²¹ (Code de l'environnement, Art. L 541-1)

²² (Code de l'environnement, Art. L 541-15-10)

remplacement de ces principaux conditionnements. Trois des quatre actions proposées ont été étudiées ou menées dans le cadre du projet REIPLIC, soit :

- Identifier et tester des contenants réemployables et lavables pour remplacer les sacs de vente directe ;
- Tester des caisses en carton étanches pour le remplacement de caisses en polystyrène expansé (PSE) ;
- Tester des sacs de vente en gros recyclables et/ou en plastique recyclé.

Les résultats de ses actions sont détaillés dans les parties suivantes.

B. Sacs de vente directe

Les sacs de vente directe sont utilisés pour le conditionnement des coquillages achetés par les particuliers sur un point de vente ponctuel (marché, place du village...) ou bien directement à l'établissement du producteur. Les coquillages étant des denrées humides, l'usage d'un sac assurant l'étanchéité est préférable. Ainsi, la plupart des producteurs distribuent gracieusement des sacs en plastique réutilisables à leurs clients mais s'aperçoivent que ces sacs sont en pratique très peu réutilisés, et finissent enfouis ou incinérés.

D'après l'enquête menée auprès des producteurs dans FILALTIQ, en moyenne, chaque répondant utilise **6545 sacs par an**, et principalement en ostréculture. Bien qu'ils représentent un coût important pour les producteurs, ces contenants sont essentiels pour la vente des coquillages. Néanmoins 80% des producteurs répondants seraient favorables à l'arrêt de la distribution de sacs en plastiques. C'est pourquoi, un travail d'enquête a été mené par la société LIGEPACK, dans le cadre du projet REIPLIC. L'objectif de cette enquête étant de définir les critères de besoins pour les contenants à coquillages qui correspondent à la fois aux producteurs et aux consommateurs finaux, et d'identifier un potentiel contenant répondant à ces attentes. Ils ont aussi été interrogés sur le mode de distribution préférentiel de ces contenants (consignes/vente).



FIGURE 37 : EXEMPLE DE SAC DE VENTE DIRECTE EN PLASTIQUE

1. Enquêtes sur les besoins des utilisateurs

a) Méthodologie des enquêtes

LIGEPACK a réalisé 2 enquêtes : une auprès des producteurs pratiquant la vente directe de coquillages et une auprès de leurs clients. Pour chaque catégorie, un questionnaire a été rédigé sous format numérique. Les questionnaires étaient gérés par les sondeurs qui ont principalement interrogé les personnes cibles sur les marchés du littoral des Pays de Loire (85 et 44) pendant la période estivale (La Tranche-sur-mer, Les Sables d'Olonne, Saint Jean-de-Mont, La Baule, Piriac-sur-Mer, ...). Le reste des personnes ont été interrogées par téléphone afin de compléter le nombre de répondants.

b) Résultats

(1) Résultats du questionnaire auprès des producteurs pratiquant la vente directe de coquillages

(a) Profil et habitudes de vente

50 producteurs et/ou vendeurs du secteur des Pays de la Loire et de Bretagne-Sud ont été interrogés, avec un profil principalement masculin âgé entre 40 et 60 ans. En moyenne les répondants :

- Utilisent les **sacs plastiques** en contenant (98%)
- Ne se prononcent pas sur les quantités utilisées et le coût des emballages, parce que les coûts sont noyés dans les frais généraux (42%). Néanmoins, parmi ceux qui se prononcent, la

majorité déclare utiliser **10 000 à 20 000 sacs** par an (soit 24% des répondants). Le prix par sac est estimé en **0.04€ et 0.07€**.

- Vendent **1 douzaine d’huîtres** (76%)
- Vendent **2 kg de moules** (56%)
- Prennent **1 à 2 minutes** pour le service (68%).

(b) *Besoins : critères importants pour le contenant*

Pour plus de 90% des producteurs répondants, il est indispensable que le contenant soit : **étanche, résistant à la perforation et avec poignée**.

Par ailleurs la refermabilité a été jugée indispensable par plus de la moitié des producteurs répondants (52%), et reste facultative pour 40% d’entre eux. Peu de répondants pensent qu’il est indispensable que le contenant soit personnalisable, mais ce serait un plus. Quant à la rigidité/souplesse du contenant, les avis sont restés disparates mais certains déclarent que la souplesse permettrait de « serrer » le produit.

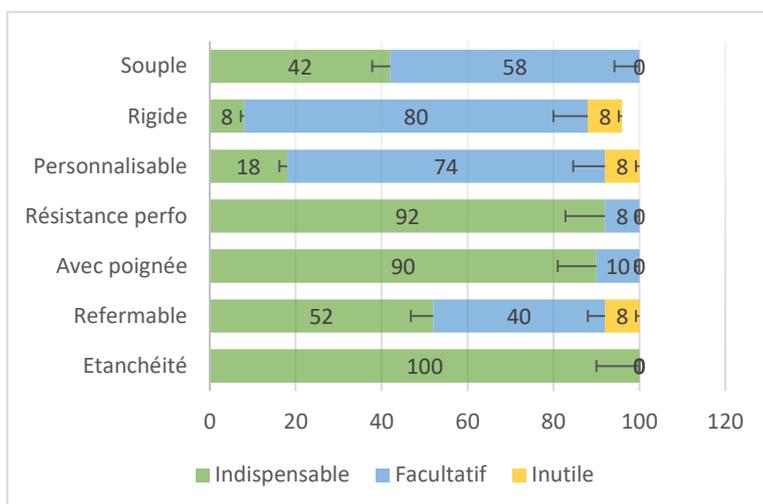


FIGURE 38 : CRITERES IMPORTANTS POUR LE CONTENANT POUR LES PRODUCTEURS/VENDEURS

D’autres critères ont été rajoutés dans les commentaires, comme le gain de place (11%), l’utilisation intuitive et la légèreté.

(c) *Système de distribution*

Les producteurs pratiquant la vente directe ont été interrogés pour savoir s’ils préféreraient travailler avec des contenants vendus ou consignés, et à quel prix.

94% d’entre eux préfèrent **la vente** du contenant plutôt que la consigne pour des raisons de :

- **Simplicité pour les vendeurs** : gestion simplifiée, gain de temps, gain d’espace (pas d’espace à réserver pour les emballages sales), simple pour la caisse (pas de gestion de flux de trésorerie)
- **Hygiène** : pas de responsabilité sanitaire, casse sur un emballage, usage inapproprié d’un emballage qui revient dans le circuit
- **Responsabilité client** : le client ramène son contenant, fait attention à son emballage, s’engage dans une démarche éco-responsable, et peut acheter des coquillages auprès d’autres collègues producteurs (multi commerçants)
- **Logistique** : 1 seul stock d’emballages neufs (pas de gestion entre les contenants neufs et les usagés).

A 98%, les producteurs et/ou vendeurs interrogés souhaiteraient vendre le contenant entre **1 et 3€**.

(2) Résultats du questionnaire auprès des consommateurs de coquillages

(a) Profils et habitudes d'achat

108 consommateurs ont été interrogés et 105 profils ont été retenus, principalement des actifs. La composition du foyer et les âges représentés sont variés, la part des jeunes étant surreprésentée vu le lieu et la période du sondage (secteur littoral en période estivale).

95 % des personnes utilisent le sac en plastique directement proposé lors de la vente. C'est une habitude très ancrée. Il est cité comme « *plus pratique et facile* », « *achat non prévu* », « *le sac est étanche et je peux continuer mon marché* ». Ils sont à plus de 93% satisfaits de cet emballage, qu'ils considèrent : adapté, solide, étanche, refermable.

Plus de la moitié des personnes interrogées achètent des huîtres et des moules que quelques fois par an, ¼ en achètent 1 fois par mois. En cette période de vacances estivales, les clients fréquents interrogés sont peu nombreux : seulement 7% achètent des moules toutes les semaines, et 20% achètent des huîtres toutes les semaines.

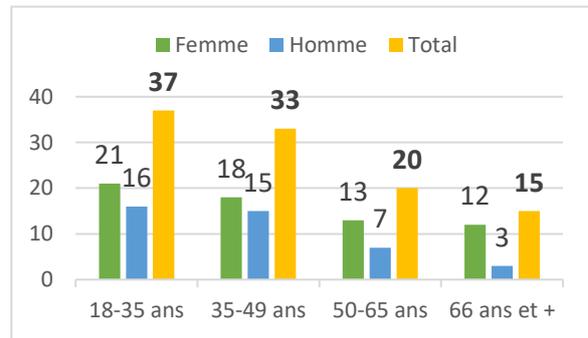


FIGURE 39 : AGE ET SEXE DES CONSOMMATEURS AYANT REPOU

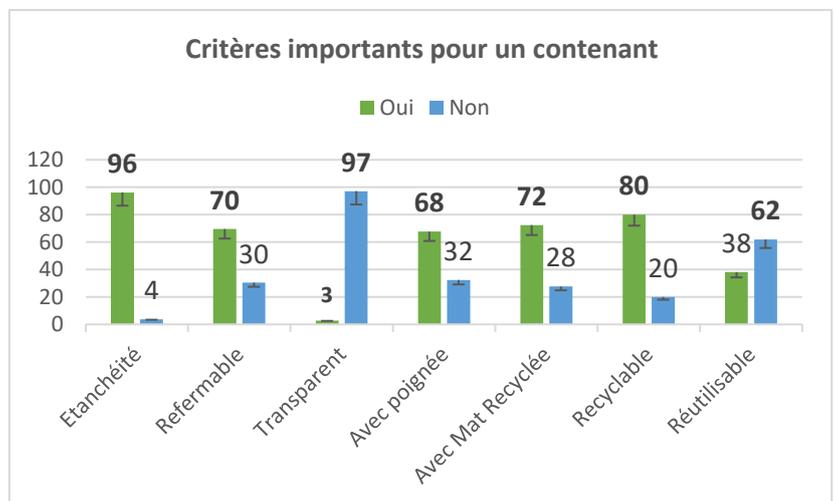


FIGURE 40 : CRITERES D'IMPORTANCE POUR LE CONTANT DU POINT DE VUE DES CONSOMMATEURS

(b) Besoins : critères importants pour le contenant

Plus de 68% des consommateurs estiment qu'il est important que le contenant proposé soit : **étanche, recyclable, intégrant de la matière recyclée, refermable et avec poignées**. En revanche il n'est pas nécessaire qu'il soit transparent ou réutilisable.

Les consommateurs ont aussi été interrogés sur le matériau idéal pour cet emballage selon eux. Il en ressort que :

- Le plastique et le bois ont été cités en tête avec respectivement 35% et 30% des réponses.
- Le plastique a été cité pour son étanchéité, sa légèreté et sa résistance.
- Le bois a été proposé pour l'aspect renouvelable, approprié aux huîtres, même s'il absorbe l'eau et qu'il ne s'adapte pas à la quantité.

(c) *Système de distribution*

Les consommateurs sont en majorité favorables (67%) à la réutilisation du contenant, que ce soit via la consigne, l'achat ou l'apport de son contenant que l'on ramène. 33% sont perplexes et présentent des inquiétudes concernant l'hygiène et l'odeur de l'emballage, surtout pour les fruits de mer.

La moitié aimerait payer moins de 1€ pour l'achat de leur contenant, tandis qu'une autre petite moitié (43%) serait prête à mettre **entre 1€ et 3€**. Les consommateurs interrogés acceptant de payer davantage sont peu nombreux (moins de 10%) (Cf Figure 41).

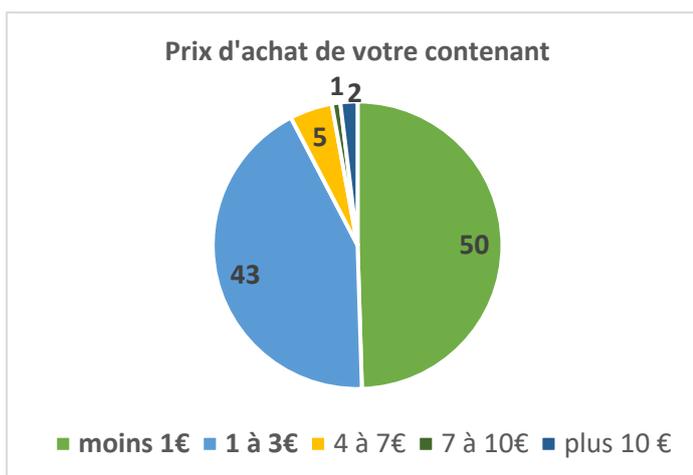


FIGURE 41 : PRIX ACCEPTABLE POUR LE CONTENANT SELON LES CONSOMMATEURS INTERROGES

(3) *Critères réglementaires*

En plus des critères évoqués par les utilisateurs, il est important de tenir compte des exigences réglementaires en termes d'emballages.

D'une part, la loi AGEC et l'instauration future du règlement Européen sur les emballages restent en faveur de conditionnements réemployables, recyclables et intégrant des matériaux recyclés. Aussi, il est donc préférable d'identifier un contenant allant dans ce sens.

Par ailleurs, il est nécessaire que le matériau soit apte au contact alimentaire.

(4) *Résultats résumés et propositions d'alternatives*

En résumé, le contenant idéal se doit d'être étanche, résistant, refermable, pourvu de poignées, apte au contact alimentaire, facilement lavable, recyclable et d'intégrer des matériaux recyclables.

Pour plus de détails sur l'enquête menée par LIGEPACK, l'ensemble des résultats se trouvent en annexe 7.

Face à ces résultats, LIGEPACK a proposé plusieurs contenants, présentés en comité de pilotage afin d'obtenir l'avis des producteurs partenaires du projet. Les contenants proposés étaient : les sacs type sac cabas, les sacs isothermes, les sacs en tissus, les emballages en bois, les bourriches en carton complexé et les seaux en plastique.



FIGURE 42 : EMBALLAGES PROPOSES PAR LIGEPACK : SAC CABAS, SAC ISOTHERME, SAC EN TISSU, BOURRICHE BOIS, BOURRICHE CARTON, SEAU PLASTIQUE

Parmi ces emballages, le seau en plastique permettait de rassembler le plus de critères, surtout sur l'aspect hygiène et nettoyage. Ce contenant est étanche, résistant, refermable avec un couvercle, portable avec une anse, adapté au contact alimentaire et facilement lavable. Souvent en plastique rigide, il est aussi facilement recyclable. De plus, il peut facilement être personnalisable

(étiquette/impression). Cependant, peu de fournisseurs proposent ce type de seaux en intégrant du plastique recyclé tout en conservant l'aptitude au contact alimentaire.

Malgré cela, ce contenant reste la meilleure alternative pour répondre aux exigences des utilisateurs. Aussi, lors de la présentation des résultats de l'enquête, la profession conchylicole semblait plutôt convaincue par la nécessité d'essayer cette alternative. Un premier essai a été proposé aux volontaires.

Dans le cadre de cette expérimentation, il était demandé aux professionnels d'imposer l'achat du contenant aux clients, afin de les responsabiliser. Cependant l'initiative faisant l'objet d'un financement du Conseil Régional, les contenants expérimentés n'ont pas finalement pu être vendus. Cela peut donc générer un biais dans les résultats concernant l'acceptabilité du consommateur.

2. Essai d'une alternative : les seaux réemployables

Face à l'engouement de la profession et afin de vérifier en conditions réelles l'adéquation de ces seaux aux attentes des utilisateurs, un essai a été proposé aux participants volontaires.

a) Méthodologie

Un appel à volontaires a été lancé par les CRC de Bretagne-Sud et des Pays de la Loire auprès des producteurs pratiquant la vente directe de coquillages. Ces derniers étaient dans un premier temps invités à une réunion permettant de redétailler la réglementation sur les emballages et se mettre d'accord sur un type de seau en plastique à tester. Pour cela, leurs avis ont été consultés sur :

- La forme du seau (rond/rectangulaire) ;
- La couleur des seaux (bleu/blanc) ;
- Le volume des seaux (3,6L/5L). Pour faire ce choix, ils étaient informés sur la quantité de moules ou d'huîtres maximales possible dans chaque seau ;
- La présence ou l'absence de couvercle ;
- La quantité de seaux nécessaire par volontaire ;
- Le design des étiquettes de seaux ;
- Le design de l'affiche explicative de la démarche ;
- Les modalités de distribution (Gratuité/vente 1€/ Vente 2€).

Un compromis entre les tarifs, la facilité d'approvisionnement, le design et les délais a été décidé. Il a ainsi été convenu de tester des seaux : **ronds, blancs, de 5L, avec couvercle**, sur lesquels ont été collé des étiquettes. Entre 100 et 300 seaux ont été distribués par participants, en fonction de leurs besoins, et des banderoles et des affiches ont été distribuées afin de communiquer sur la démarche. Les seaux ont été fournis par l'entreprise française FIDEL FILLAUD, les étiquettes par ETIKOUEST. Pour le volume commandé, le prix de revient par seau s'élevait à 1,09€ par seau et 0,41€ par étiquette, soit un total de **1,5€** par seau personnalisé.

Comme indiqué précédemment, au vu du financement régional, il a été imposé aux volontaires de **distribuer les seaux gratuitement**. La profession aurait préféré pouvoir faire payer 2€ par clients pour l'achat du seau afin de mieux rendre compte de la propension des clients à acheter un contenant réutilisable et d'engager leur responsabilité de consommateur.



FIGURE 43 : EXEMPLE DE SEAU, ET DESIGNS DES ÉTIQUETTES, AFFICHES ET BANDEROLES DISTRIBUÉES

Les résultats attendus de cette expérimentation étaient :

- Un retour des professionnels sur la praticité (résistance, stockage, etc..), les quantités distribuées, et le taux de retour des seaux pour les achats ultérieurs.
- Un retour des avis clients : pour cela, un questionnaire sous forme de QR code a été placé sur l'étiquette du seau pour récupérer l'avis de clients sur ce contenant. Dans ce questionnaire les utilisateurs sont interrogés pour noter de 1 à 5 (5 étant la meilleure note) :
 - o La taille / volume du seau ;
 - o La solidité de la poignée, du seau et du couvercle ;
 - o La facilité d'ouverture/fermeture ;
 - o La facilité de nettoyage ;
 - o La praticité ;
 - o La réutilisation ;
 - o La propension à payer 2€ un seau.

b) Résultats/ Satisfaction

L'appel à volontaires s'est avéré très fructueux, de nombreux producteurs pratiquant la vente directe ayant souhaité participer à l'essai des seaux. Cela est très encourageant et souligne un réel souhait de la profession de réduire leur impact en changeant leurs habitudes sur les sacs de vente directe. Au total, **13 440 seaux** ont pu être répartis équitablement auprès de :

- 27 professionnels des pays de la Loire
- 30 professionnels de Bretagne-Sud

(1) Retour des producteurs/vendeurs sur les seaux

Des retours oraux des producteurs ont été transmis au SMIDAP et aux deux CRC. La satisfaction est globale. Vu que l'expérimentation a été menée de fin décembre à fin février, les retours sont encore récents, et n'ont pas pu permettre de couvrir la période de vente des moules. Un recul est nécessaire pour rendre compte de l'adéquation du seau pour les moules et pour évaluer la résistance des seaux surtout après un stockage long.

Aucune contrainte particulière sur la logistique n'a été citée. Les professionnels ont surtout fait part de l'importance du temps nécessaire à la sensibilisation des clients sur la démarche. Même si la démarche volontaire des conchyliculteurs est bien présente, le changement ne dépend pas uniquement d'eux, et l'attention des clients à ce sujet est nécessaire.

Ils ont aussi fait part de leur volonté de poursuivre l'opération, en proposant différentes tailles, afin de s'adapter au mieux à tous les achats

(2) Retour des consommateurs sur les seaux

69 réponses ont été obtenues via le QR code mis à disposition sur les étiquettes des seaux. Parmi ces réponses 2 ont été données par des personnes n'ayant pas accepté le seau, toutes les autres ont été données par des utilisateurs.

Pour chacun des volets, au moins 64% des répondants ont attribué la meilleure note (5/5), et 80% des répondants ont attribué 4/5 ou 5/5, soit une satisfaction importante. Ainsi, les usagers estiment que le seau se nettoie bien, est solide et à la bonne taille. Plus de réserves ont été émises sur la facilité d'ouverture et fermeture du seau.

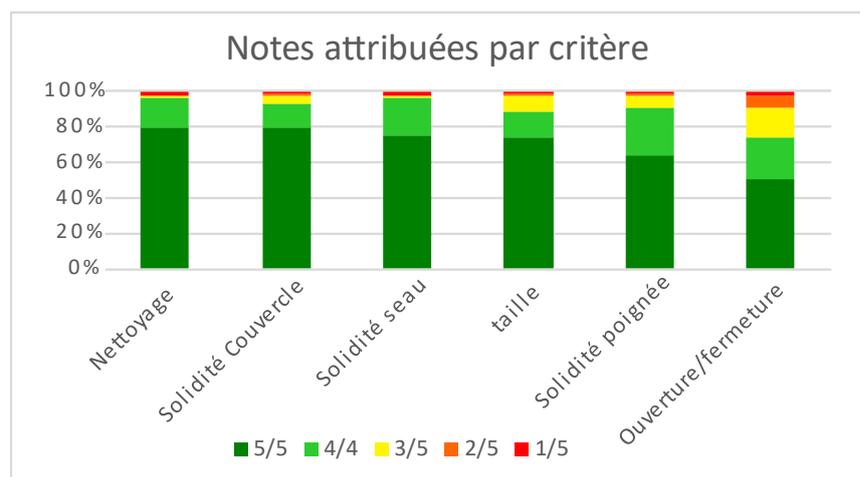


FIGURE 44 : NOTES ATTRIBUEES PAR LES UTILISATEURS

Quant au prix, seulement 60% seraient prêts à payer le seau 2€.

Par ailleurs, une section « remarques » était disponible dans le questionnaire et 32 remarques ont été notifiées. Parmi ces remarques :

- 20 d'entre elles font référence à une « bonne idée », « pratique » ;
- 4 font références à des difficultés avec le couvercle ;
- 3 font référence à la nécessité de mettre en place un système de consigne et de remplacement en cas de casse, ou suggèrent de simplement solliciter les clients à ramener leur propre contenant déjà en leur possession ;
- 5 déplorent le matériau plastique. Le bois est suggéré ;
- 2 portent sur le besoin de différentes tailles/formes de seaux, pour en mettre plus, ou faciliter le stockage à plat des huîtres.

c) Conclusions sur l'essai des seaux

Globalement les résultats des utilisateurs sont très satisfaisants. Les seaux pourraient se présenter comme une bonne alternative aux sacs de vente directe, à minima pour la clientèle hors saison estivale. Il serait intéressant de poursuivre les essais, tout à long de l'année pour avoir plus de recul sur les achats de moules et les avis en période estivale.

Aussi, afin de s'assurer de l'avantage sur l'environnement, il serait intéressant d'estimer le nombre de réutilisations possibles et de réaliser une analyse cycle de vie, prenant en compte la fin de vie des seaux, en comparaison avec les sacs plastiques conventionnels.

De plus, le prix de 1,50€ correspond au prix d'achat en gros des seaux. Cet investissement pourrait s'avérer plus important pour les producteurs, lors d'achats de manière individuelle. Vu la réticence des utilisateurs à payer le contenant 2€, il pourrait être judicieux de grouper les commandes, et de réitérer un test en vendant les seaux aux consommateurs, afin de les responsabiliser. Plusieurs tailles de seaux pourraient être proposées afin de convenir au plus grand nombre.

Dans tous les cas, l'investissement de la profession sur ces essais a été très importante. Un temps non négligeable est à accorder pour la sensibilisation des clients. L'efficacité du changement dépend aussi de l'évolution générale des mœurs.

Cet essai représente une première étape vers le réemploi des emballages pour les produits de la mer. Une généralisation de l'utilisation de ce type de contenant, avec une mise en place de systèmes de consignes/nettoyages/recyclage indépendant serait à étudier.

C. Caisses à naissain

La filière conchylicole utilise principalement des caisses PSE pour le conditionnement de naissain d'huîtres. Les caisses PSE, légères, isothermes et peu chères sont très prisées pour la conservation à température contrôlée des produits sensibles comme les mollusques bivalves vivants, mais elles ne sont pas facilement recyclables et de nombreuses petites billes de polystyrène peuvent s'en détacher et polluer l'environnement à terme. Par ailleurs, la loi AGECE stipule que ce matériau pourrait être interdit si une filière de recyclage du polystyrène n'est pas mise en place d'ici 2025. Il est donc important de trouver des solutions alternatives.

Les écloserieurs, principaux utilisateurs de ces caisses, sont essentiellement répartis en Vendée. Nombre d'entre eux ont répondu favorablement pour participer à l'essai d'alternatives dans l'enquête menée dans le projet FILALTIQ.

Il a donc été décidé de tester des caisses, recyclables, en carton recouvert d'une fine pellicule plastique.

a) Méthodologie

Le SMIDAP était en contact avec la société SUMBOX pour commander une centaine de boîtes en carton étanche distribuées à 3 écloseries volontaires. Un format standard a été sélectionné de 600x400x145 mm. Ce format permettait :

- De supporter le poids du naissain
- La palettisation
- De s'approcher des formats habituellement utilisés par les écloserieurs
- D'éviter le surcoût lié à la fabrication des outils spécifiques de coupe.

Un retour des écloseries était attendu, notamment sur :

- La satisfaction générale

- La facilité de manutention (pliage/stockage)
- La résistance physique de la caisse (humidité et charge)
- Les propriétés isothermiques de la caisse.

b) Résultats des essais de caisses en carton

Une trentaine de caisses en cartons ont été réceptionnées pliées par chacune des 3 écloséries participantes.

(i) Préparation – Formation des caisses

Le dépliage pour la mise en forme des caisses a été jugé trop difficile. 2 à 3 minutes en moyenne ont été nécessaires pour déplier les caisses. Même si l'habitude permet d'être un peu plus rapide, des douleurs aux doigts apparaissent dès les 3 premières caisses. Ce temps et cette pénibilité sont peu envisageables au quotidien.



FIGURE 45 : CAISSE REMPLIE DE NAISSAIN

(ii) Remplissage/Resistance mécanique

Les caisses ont supporté le poids de 15kg de marchandises. Les testeurs ont été agréablement surpris par la résistance mécanique des caisses.

Un essai de palettisation a été mené avec 8 caisses empilées, remplies de 12kg de naissains. Après empilement, les caisses se sont bien tenues, sans signe d'affaissement. A volume utile équivalent, les caisses en carton sont moins encombrantes. Il serait donc possible d'empiler plus de caisses sur les palettes, et donc plus de naissains.

Cependant, les écloséries ont rencontré plus de difficultés pour fermer les caisses. En effet, il faut plus de temps pour mettre le couvercle. Pour s'assurer que le couvercle tienne bien, il est aussi important de celer les boîtes. Les écloséries ont utilisé du scotch.

(iii) Resistance à l'humidité

Les caisses sont bien étanches, et permettent la retenue de l'eau. Elles ont même pu être réutilisées une deuxième fois par une éclosérie. Le carton ne ramollit pas.



FIGURE 46 : RETENUE DE L'EAU – ETANCHEITE

(iv) Isothermie

Les caisses en cartons n'isolent pas ou peu du froid, contrairement aux caisses en polystyrène.

(v) Survie du naissain après transport

Le naissain a survécu dans tous les essais qui ont eu lieu en fin d'année, où les températures sont plus fraîches. Même en exportation à l'étranger, ce conditionnement a permis de conserver la qualité du produit.

(vi) Stockage/manutention

Au stockage dans une pièce humide, des traces d'humidité sont apparues sur les bords des caisses, sans diminuer leur résistance mécanique.

(vii) Tarif

Le coût du carton fluctue, tout comme pour le polystyrène. En février 2022, le prix d'une caisse de 600x400x145 s'élevait à 2,40€ HT, avec couvercle. Des minimums de commande autour de 1500 cartons par commande sont requis.

c) Conclusions générales des essais de caisse

Les écloseurs ont été agréablement surpris par la résistance des caisses qui supportent bien l'humidité, le poids et la palettisation.

Etant donné le faible pouvoir isotherme des caisses, il serait nécessaire d'être plus vigilant sur les conditions de transport, d'autant plus en été. Il serait recommandé d'organiser un transport réfrigéré, d'autant plus sur les longues distances, néanmoins ce transport est plus coûteux en énergie.

La plus grosse limite à l'usage de ces caisses reste le pliage qui est fastidieux. Il existe des solutions de pliage mécanique. Cependant, le premier prix s'élève à 55 000€ et peut atteindre 100 000€. Face aux volumes concernés, cet investissement reste trop conséquent pour être rentable. L'idéal serait de mettre en place un intermédiaire de pliage. Cet intermédiaire serait responsable du pliage des caisses en carton de toutes les écloséries, et de potentielles autres entreprises.

En espérant trouver des caisses plus faciles à plier, et d'origine française (SUMBOX étant une entreprise espagnole), d'autres entreprises de fabrication de caisses en carton étanches françaises avaient été contactées : SMURFIT KAPPA et SOLIDUS SOLUTION. Ces entreprises ont fourni des échantillons de caisses en carton étanche. Celles proposées par SMURFIT KAPPA étaient encore plus difficiles à plier. Celles de SOLIDUS SOLUTION étaient très faciles à plier, mais comportaient des trous dans les coins (adaptées pour le transport de poisson, mais non pour le naissain). Un travail de R&D pourrait éventuellement être réalisé avec ces entreprises pour développer une caisse résistante, plus facile à plier afin d'éviter l'épuisement de la main d'œuvre.

D. Sacs de vente en gros

Les sacs de vente en gros sont principalement utilisés par les mytiliculteurs et les ostréiculteurs. L'enquête de FILALTIQ a identifié que la plupart de ces sacs sont plastiques, essentiellement en polypropylène (PP) tissé et polyéthylène haute densité (PEHD) pour les « sacs Rashels ». En conclusion du travail de cette enquête menée auprès des professionnels, il était suggéré de tester des sacs tissés en polyéthylène recyclé (rPET).



FIGURE 47 : SACS POLYPROPYLENE TISSE (GAUCHE) ET SAC RASHEL (DROITE).

1. Problématiques rencontrées et limites du rPET

Le prestataire GPK service avait été identifié pour fournir 8000 sacs en rPET tissé. Malheureusement, au moment de la commande, l'entreprise située en Albanie, victime de l'inflation, était en liquidation. Un approvisionnement alternatif avait été proposé depuis l'Indonésie, mais pour un minimum de 16000 unités, ce qui n'a pas rendu possible l'achat.

Le PET est un matériau facilement recyclable pour des usages autres qu'alimentaires (textile, mobilier urbain etc...). Mais il est plus compliqué de fabriquer du rPET répondant aux exigences de qualité alimentaire. En effet, pour ce faire, il est nécessaire de n'utiliser que du PET initialement de qualité alimentaire, soit le PET issu des bouteilles transparentes de boissons. Il faut aussi respecter des normes strictes et des procédures rigoureuses à chaque étape du processus, de la manipulation des bouteilles en PET destinées au recyclage à l'entretien des machines chargées de les broyer et de les déchiqeter.

Selon l'ADEME, 370kT de bouteilles ont été mises sur le marché en 2022²³, et seulement 60,3% de ces bouteilles ont été collectées. Ainsi, même dans un idéal ou 100% de ces bouteilles collectées serait

²³ (ADEME)

réellement recyclées en nouvelles bouteilles constituées à 100% de rPET de qualité alimentaire, on ne pourrait produire que 60,3% de la demande de bouteille alimentaire en matériau 100% recyclé.

En réalité, sur les 60,3% collectées, une part ne pourra pas être recyclée (bouteille pleine, souillure, mauvaise détection...). Par exemple, SUEZ peut produire 33 000 T de rPET par an à partir de 45 000 T de PET plastique collecté, soit un rendement de 76%.²⁴ Il est donc toujours nécessaire d'utiliser une part de matière première non recyclée pour assurer la production annuelle.

Ainsi, en France, la demande pour le rPET est supérieure à l'offre, et d'autant plus dans le contexte où la réglementation pousse de plus en plus à intégrer des matériaux recyclés aux emballages. Ainsi les producteurs de boissons doivent faire le choix de n'intégrer du rPET que sur certaines gammes, ou de limiter le pourcentage d'incorporation.

Il est alors difficile de se procurer cette matière première. Il ne s'agit donc peut-être pas de la meilleure alternative aux sacs de vente en gros actuellement utilisés.

2. Recherche d'alternatives au rPET

Une autre piste avait été envisagée pour mieux valoriser les sacs de vente en gros conventionnels en identifiant une filière de recyclage. Et ce, principalement pour les sacs en PP tissés qui s'apparentent aux matériaux des « big-bags », pour lesquels il semblerait qu'il existe des solutions de recyclage. Des entreprises concernées ont été contactées pour des essais, mais aucun retour n'a pu être obtenu. Face à ces difficultés, le choix de se concentrer sur les essais d'alternatives de caisses à naissains et de contenants de vente direct a été fait.

E. Conclusions générales sur les alternatives aux conditionnements conchylicoles

La profession conchylicole s'est montrée très impliquée dans cette démarche de recherche d'alternatives durables pour leurs conditionnements « traditionnels ». Que ce soit dans un intérêt environnemental et/ou économique, il est nécessaire de souligner l'importance de ce sujet qui touche tous les maillons de la filière, quel que soit le corps de métier ou l'espèce cultivée.

Bien que le plastique soit très largement pointé du doigt pour son impact environnemental, ses propriétés en font un matériau difficilement remplaçable et d'autant plus pour répondre aux normes sanitaires de l'alimentation. Si bien que les alternatives testées sont tout de même intégralement ou partiellement en plastique (film sur le carton). Il est important que ces contenants soient à minima recyclables. L'idéal étant de minimiser la quantité de contenants utilisés et de favoriser le réemploi.

Le développement d'innovations, notamment d'un point de vue matériaux est à envisager. Il pourrait être notamment boosté par la législation avec l'application du règlement Européen PPWR. Ces innovations pourraient peut-être permettre d'identifier d'autres solutions pour remplacer les sacs de vente en gros et les caisses en polystyrène.

En attendant ce développement, l'essai des seaux en plastique ayant remporté un franc succès, il serait intéressant de pouvoir poursuivre ce travail, et de l'élargir à d'autres professionnels. Il serait aussi pertinent d'étudier plus en détail l'impact global de ces seaux en comparaison avec les sacs en plastiques 50 microns, via une analyse cycle de vie. Cette analyse permettrait de quantifier le nombre minimal de réutilisations nécessaires pour amortir l'impact de sa production et de sa fin de vie, en comparaison avec les sacs plastiques.

²⁴ (SUEZ, s.d.)

Bibliographie

- ADEME. (2020). *Revue des normes sur la biodégradabilité des plastiques*.
- ADEME. (2023). *Les limites des emballages en plastique compostables*.
- ADEME. (s.d.). *Évaluation du taux de collecte des bouteilles en plastique de boisson pour 2021 et 2022*.
- Butler, S., Freckleton, R., Renwick, A., & Norris, K. (2012). *An objective, niche-based approach to indicator species selection*. British Ecological Society - Methods in Ecology and Evolution.
- Carli, S. 2. (s.d.). Développement d'une méthodologie pour l'évaluation et la maîtrise des impacts sanitaires et environnementaux des polymères destinés à un usage en mer : application à l'ostréiculture. 2021.
- Code de l'environnement. (Art. L 218-73).
- Code de l'environnement. (Art. L 541-1).
- Code de l'environnement. (Art. L 541-15-10).
- Code de l'environnement. (Art. L 541-2).
- Comité National de la Conchyliculture. (s.d.). *La naissance de l'ostreiculture*. Récupéré sur coquillages.com: <https://coquillages.com/la-naissance-de-la-mytiliculture/>
- Coopération Maritime. (s.d.). *Les projets*. Récupéré sur L'atelier EPU: <https://www.atelier-epu.fr/>
- Garcia, C. T. (1992). Phytotoxicity due to the agricultural use of urban wastes. , . *Germination experiments. J. Sci. Food Agric.*, 59:313-319.
- Hégron, A. (2019). *Utilisation de la larve d'oursin Paracentrotus lividus pour tester la toxicité de matériaux plastiques issus de la pêche et de la conchyliculture*. SMEL / Université de Rennes 1.
- Julie Maheut, SMIDAP. (2019). *BIOFILET*.
- Julie Maheut, SMIDAP. (2020 - 2021). *FILALTIQ*.
- Julie Maheut, SMIDAP. (2020-2021). *FILALTIQ*.
- Pétinay S., C. C. (2009). Standardization of larval development of the sea urchin, Paracentrotus lividus, as tool for the assessment sea water quality. *C. R. Biologies Vol.332*.
- Ramade, F. (1992). *Précis d'écotoxicologie*. Masson, Paris.
- Recycler les bouteilles en plastique pour un usage alimentaire*. (s.d.). Récupéré sur SUEZ: <https://www.suez.fr/fr-fr/notre-offre/succes-commerciaux/nos-references/fpr-recyclage-bouteilles-en-plastique#:~:text=Recycler%20les%20bouteilles%20en%20plastique,alimentaires%2C%20comme%20les%20fibres%20textiles>
- ROMPLASTICA. (s.d.). *Dualnet*. Récupéré sur <https://www.romplastica.net/fr/prodotti/dualnet/>
- SEABIRD. (s.d.). *Produits*. Récupéré sur SEABIRD: <https://www.seabird.fr/produits.php>
- Secrétariat général de la mer et Clusteur Maritime Français. (2022). *L'économie bleue en France*.

Sesay AA, L. K. (1997). Controlled composting of paper pulp sludge using the aerated static pile method. *Compost Science and Utilization* , 82-96.

SUEZ. (s.d.). *Recycler les bouteilles en plastique pour un usage alimentaire*. Récupéré sur SUEZ: <https://www.suez.fr/fr-fr/notre-offre/succes-commerciaux/nos-references/fpr-recyclage-bouteilles-en-plastique#:~:text=Recycler%20les%20bouteilles%20en%20plastique,alimentaires%2C%20coccime%20les%20fibres%20textiles>

Vocabulaire des matériaux de l'environnement. (2023). *Journal officiel*.

Glossaire

Analyse cycle de vie	Compilation et évaluation des consommations d'énergie, des utilisations de matières premières et des rejets dans l'environnement, ainsi que de l'évaluation de l'impact potentiel sur l'environnement associé à un produit ou un procédé ou un service, sur la totalité de son cycle de vie. (ISO 14040)
Biodégradable	Un matériau est dit biodégradable s'il est dégradé par des micro-organismes. Le résultat de cette dégradation est la formation d'eau, de CO ₂ et/ou de CH ₄ et, éventuellement, de sous-produits – résidus, nouvelle biomasse – non toxiques pour l'environnement. (ADEME,2005)
Bioplastique	Plastique biosourcé et biodégradable. (Journal officiel du 22/12/2016).
Biosourcé	Se dit d'un produit ou d'un matériau entièrement ou partiellement fabriqué à partir de matières d'origine biologique. (Journal officiel du 22/12/2016)
Compostage	Le compostage est un procédé de transformation aérobie de matières fermentescibles dans des conditions contrôlées. Il permet l'obtention d'une matière fertilisante stabilisée riche en composés humiques, le compost, susceptible d'être utilisé, s'il est de qualité suffisante, en tant qu'amendement organique améliorant la structure et la fertilité des sols. Le compostage s'accompagne d'un dégagement de chaleur et de gaz, essentiellement du gaz carbonique si l'aération est suffisante. (ADEME, 2015, p. 3)
Ecotoxicité	Capacité d'une substance, du fait de sa toxicité, de produire des effets nuisibles ou incommodants pour des micro-organismes, des animaux, des plantes, ou pour l'homme par le biais de l'environnement.
Réemploi	Toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui ne sont pas des déchets sont utilisés de nouveau pour un usage identique à celui pour lequel ils avaient été conçus. (Code de l'environnement)

Liste des abréviations, sigles et acronymes

ACV : Analyse Cycle de Vie

ADEME : Agence de la transition écologique

AGEC : Anti-Gaspillage pour l'Economie Circulaire

BS : Bretagne Sud

CNC : Comité National de la Conchyliculture

CRC : Comité Régional de la Conchyliculture

COFIL : Comité de Pilotage

Dtex : décitex

ELISA : tests conçus pour la détection d'antigènes ou d'anticorps pour des bactéries ou des virus

FILALTIQ : projet, Fabrication et tests de FILets mytilicoles biosourcés et compostables et Recherche d'ALternatives aux conditionnement plasTIQUES pour les coquillages

PDL : Pays de la Loire

PEHD : Polyéthylène Haute densité

PLA : acide polylactique

PP : Polypropylène

PPWR : Proposal Packaging and Packaging Waste regulation

PSE : Polystyrène expansé

R

rPET : Polytéraphthalate d'Ethylène Recyclé

TGAP : Taxe Générale sur les Activités Polluantes

SMEL : Syndicat mixte Synergie Mer Et Littoral

SMIDAP : Syndicat Mixte pour le Développement de l'Aquaculture de et la Pêche

Liste des figures

Figure 1 : Boudins de moules et pieux garni	9
Figure 2 : Pieu recouvert d'un filet de catinage	9
Figure 3 : Filet de catinage extrudé (sea212)	10
Figure 4 : Schéma d'explication des dimensions de filets	11
Figure 5 : Filet de catinage tricoté (pla)	11
Figure 6 : Filet à boudin extrudé (sea 212).....	11
Figure 7 : Filet à boudin tricote (pla + coton).....	12
Figure 8 : Localisation des mytiliculteurs participants aux essais de filets	13
Figure 9 : De gauche à droite, Enfilage du filet sur l'engin à catiner ; Enfilage sur le pieu ; Pieu tout juste couvert d'un filet	14
Figure 10 : De gauche à droite ; 1 - Pêcheuse autour d'un pieu ; 2 - Pêcheuse relevée après pêche du pieu ; 3 - déversement du contenu de la pêcheuse dans une caisse-palette ; 4 - dégrappeur ; 5 - ensemble de chaîne de tri à terre	15
Figure 12 : Dégrappeur à dents ; vue extérieure ; vue intérieure.....	16
Figure 11 : Dégrappeur conique ; vue extérieure ; vue intérieure.....	16
Figure 13 : Schéma – Isolation des pieux catinés avec les différents filets dans des bacs séparés	16
Figure 14 : Schéma de la chaîne de tri comportant le dégrappeur à dents, et position des bacs de rejets (bacs rouges)	16
Figure 15 : Schéma de la chaîne de tri comportant le dégrappeur conique, et position des bacs de rejets (bacs rouges)	17
Figure 16 : Schéma protocole de calcul de rendement net par pieu	17
Figure 17 : A gauche, table à boudins, à droite, machine à boudins	18
Figure 18 : Pose des filets de catinage extrudés en SEA212	19
Figure 19 : Moules ressorties des filets sur un pieu.....	19
Figure 21 : Fragments trouvés sous une laveuse	20
Figure 20 : Nombre de fragments comptés par pieu, pour chaque type de filet, avec différents dégrappeurs	20
Figure 22 : Répartition des tailles de fragments	20
Figure 23 : Bobine sortie de son tube au déroulage	21
Figure 24 : Zone de rupture des filets tricotés en PLA	21
Figure 26 : Fragments trouvés sous la laveuse espagnole (chaîne dégrappeur à dents)	22
Figure 25 : Nombre de fragments comptés par pieu pour chaque type de filet avec différents dégrappeurs	22
Figure 27 : Machine pour les essais de traction	24
Figure 28 : Echantillon sur pieu	24
Figure 29 : Résultat des mesures de forces à la rupture pour tous les échantillons	26
Figure 30 : Résultats des mesures de l'allongement à la rupture, pour tous les échantillons.....	26
Figure 31 : Schéma du protocole de collecte et préparation des filets pour le compostage	30
Figure 32 : Schéma du processus de compostage	31
Figure 33 : filets enroulés autour de l'axe du composteur	32
Figure 34 : compost des 2 lots obtenus après maturation, et exemple de résidus de filets. a : portion 15% filets, B portion 23% filets.....	32
Figure 35 : photo de l'installation pour la production des lixiviats à partir des échantillons	36
Figure 36 : De gauche à droite : Larves bien formées ; larves malformées ; larves non développées .	37
Figure 37 : Exemple de sac de vente directe en plastique	45
Figure 38 : Critères importants pour le contenant pour les producteurs/vendeurs	46
Figure 39 : Age et sexe des consommateurs ayant répondu	47

Figure 40 : Critères d'importance pour le contant du point de vue des consommateurs	47
Figure 41 : Prix acceptable pour le contenant selon les consommateurs interrogés	48
Figure 42 : Emballages proposés par ligepack : sac cabas, sac isotherme, sac en tissu, bourriche bois, bourriche carton, seau plastique	48
Figure 43 : exemple de seau, et designs des étiquettes, affiches et banderoles distribuées	50
Figure 44 : Notes attribuées par les utilisateurs	51
Figure 45 : caisse remplie de naissain	53
Figure 46 : Retenue de l'eau – Etanchéité.....	53
Figure 47 : Sacs polypropylène tissé (gauche) et sac rashel (droite).	54

Liste des tableaux

Tableau 1 : Présentation des sites d'essais	13
Tableau 2 : Calendrier des essais de filets de caitnage en matériaux biosourcés et compostables.....	18
Tableau 3 : Résumé de la performance des filets testés en conditions réelles	22
Tableau 4 : Liste des échantillon testés a la traction	25
Tableau 5 : Chronologie des essais de compostage.....	31
Tableau 6 : Résumé résultats compostage.....	34
Tableau 7 : Liste des échantillons et composition	37
Tableau 8 : Echantillons testés dans les analyses d'écotoxicité chronique	40
Tableau 9 : Tarifs de différents matériaux pour la production de filets mytilicoles	41

ANNEXES

Table des Annexes

Annexe 1 : Fiche terrain – Evaluation de la fragmentation des filets au moment de la pêche
Annexe 2 : Compte rendu – Essais de tractions IDESYS
Annexe 3 : Compte rendu – Essais de tractions CENTRALE NANTES
Annexe 4 : Compte rendu – Essais de compostage UPCYCLE
Annexe 5 : Compte rendu – Analyses d'écotoxicité aigüe SMEL
Annexe 6 : Compte rendu - Analyses d'écotoxicité chronique PLASTIC AT SEA
Annexe 7 : Compte rendu – Enquête utilisateurs – alternatives sacs en plastique LIGEPACK



Polytech Nantes

IdéSYS - SMIDAP

Essai de traction des filets de catinage biosourcés et compostables

Johann Roos



15 juin 2022

Introduction

Cette première série de tests mécaniques a pour objectif de mesurer l'éventuelle perte de performance mécaniques des filets de catinage après plusieurs mois sans utilisation (stockés en garage). On dispose pour cela de filets produits en 2021, stockés 6 mois en garage, et de filets produits en avril 2022, neufs.

Cela permettra de comparer la qualité de production entre 2021 et 2022. On comparera également les caractéristiques mécaniques de ces filets par rapport à un filet dit "conventionnel".

Nommage des échantillons

Afin de faciliter la présentation de résultats et pour simplifier les appellations des différents échantillons, il a été convenu de nommer les échantillons de la manière suivante :

- NF_95 : Nouveaux Filets produits en Avril 2022, taille 95
- NF_100+ : Nouveaux Filets produits en Avril 2022, taille 100 (nouvelles filières)
- AF_95 : Anciens Filets produits en 2021, taille 95
- AF_100 : Anciens Filets produits en 2021, taille 100
- CONV_100 : Filet Conventionnel, taille 100

Essai mécanique

Dans le cadre de l'étude, nous précéderons à des essais de traction¹. Les échantillons étant non-conventionnels (ce ne sont pas des éprouvettes de traction), on déterminera seulement la force nécessaire pour rompre les filets (force à rupture, exprimée en Newton N).

On s'intéressera également au déplacement de la traverse de la machine de traction entraînant la rupture, afin de savoir si les filets vont peu ou beaucoup se déformer avant de rompre.

Les essais seront réalisés dans le sens radial du filet², de manière à simuler la croissance des moules à l'intérieur du filet de catinage. On réalisera au moins 8 essais de traction³ par type d'échantillon afin d'avoir des séries statistiques exploitables (moyennes, écart-type...)

1. La machine utilisée est une Zwick-Roell Z1.O TS

2. Le placement du filet dans la machine de traction est détaillé en annexe.

3. Finalement, 10 essais de traction ont été réalisés pour chaque échantillon.

Résultats

Force à rupture

Les 10 essais de traction par échantillon permettent de donner la force à rupture moyenne pour chaque filet, ainsi qu'une incertitude, ici l'écart-type. Les résultats sont présentés dans le Tableau 1 :

Echantillon	Force à rupture (N)
AF_95	24,6 ± 9,4
AF_100	32,2 ± 9,2
NF_95	30,2 ± 10,2
NF_100+	31,8 ± 10,0
CONV_100	49,2 ± 1,8

TABLE 1 – Force à rupture en Newton pour l'ensemble des échantillons

Afin d'avoir une présentation plus visible des résultats, on peut tracer l'historique suivant (Figure 1), les incertitudes étant modélisées par les barres d'erreur en rouge.

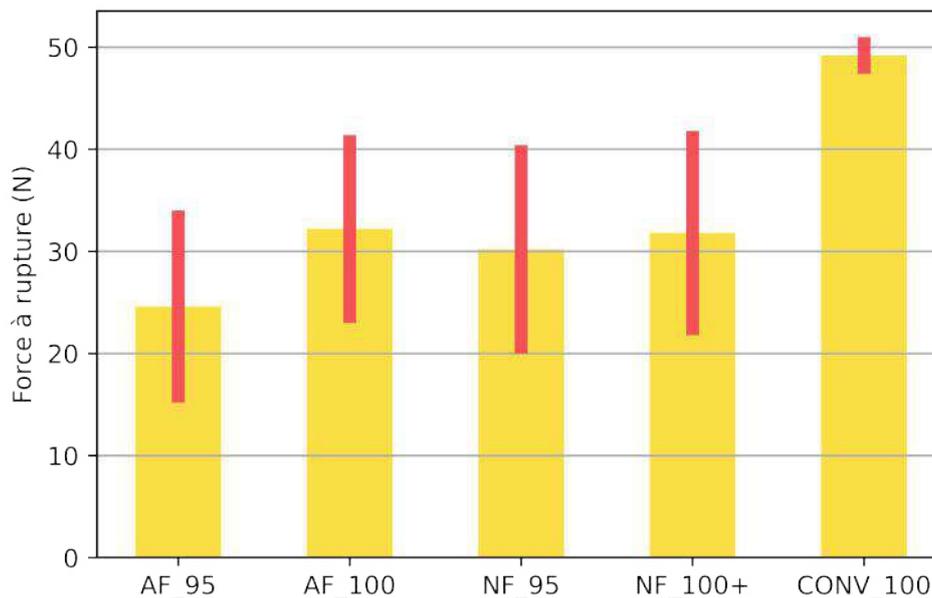


FIGURE 1 – Force à rupture (N) pour l'ensemble des échantillons

On peut voir une augmentation de la force à rupture entre AF_95 et NF_95, on passe de 24,6 à 30,2 N. A l'inverse, elle diminue très légèrement entre AF_100 et NF_100+, on passe de 32,2 à 31,8N. On remarque que la force à rupture du filet "conventionnel" est plus élevée, avec une moyenne à 49,2N. Cependant, les valeurs des écarts-type sont assez élevées, ce qui rend la comparaison difficile entre les anciens et les nouveaux filets.

Etant donné que nous avons réalisé 10 mesures (soit 2 de plus que spécifié dans le cahier des charges), nous pouvons étudier les valeurs obtenues et écarter les valeurs trop faibles ou trop élevées, non cohérentes par rapport aux autres mesures de la série. On gardera au moins 8 mesures à chaque fois, ce qui nous permet toujours d'avoir un nombre suffisant de valeurs à traiter.

Prenons par exemple la série de mesures sur le filet AF_95 :

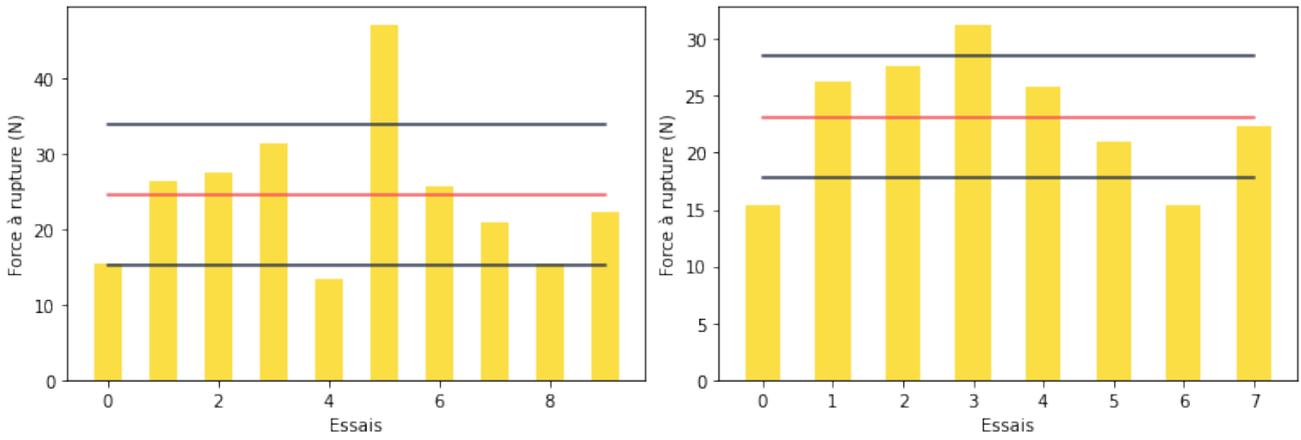


FIGURE 2 – Mesures de la force à rupture pour le filet **AF_95**. A gauche : toutes les mesures. A droite : après avoir écarté les valeurs les plus extrêmes. Le trait rouge représente la moyenne, et les traits noirs représentent l'incertitude.

On passe de $24,6 \pm 9,4$ N à $23,1 \pm 5,3$ N. On a bien réduit l'écart-type, nous obtenons donc un résultat plus précis.

On peut procéder de la même manière pour les autres filets :

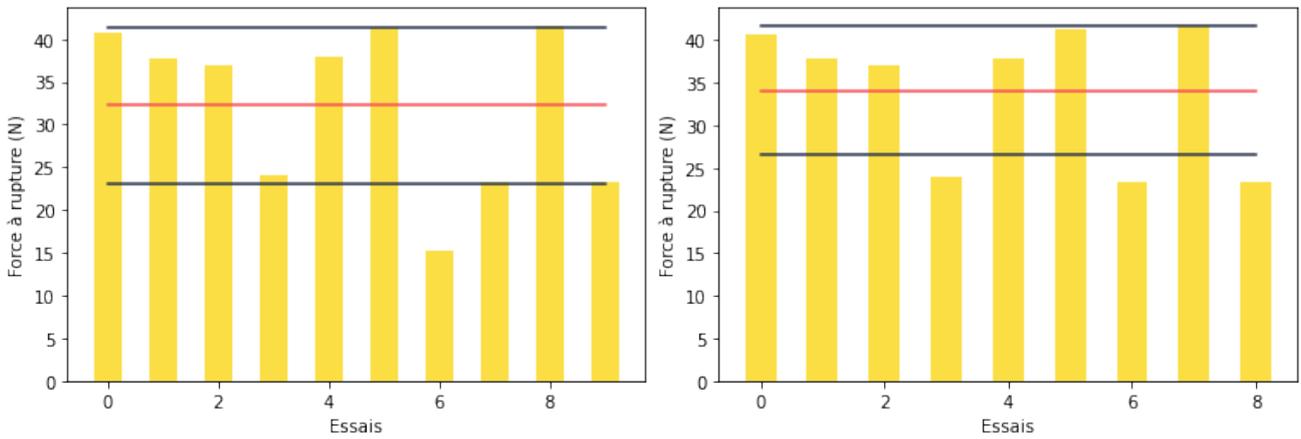


FIGURE 3 – Mesures de la force à rupture pour le filet **AF_100**. A gauche : toutes les mesures. A droite : après avoir écarté les valeurs les plus extrêmes.

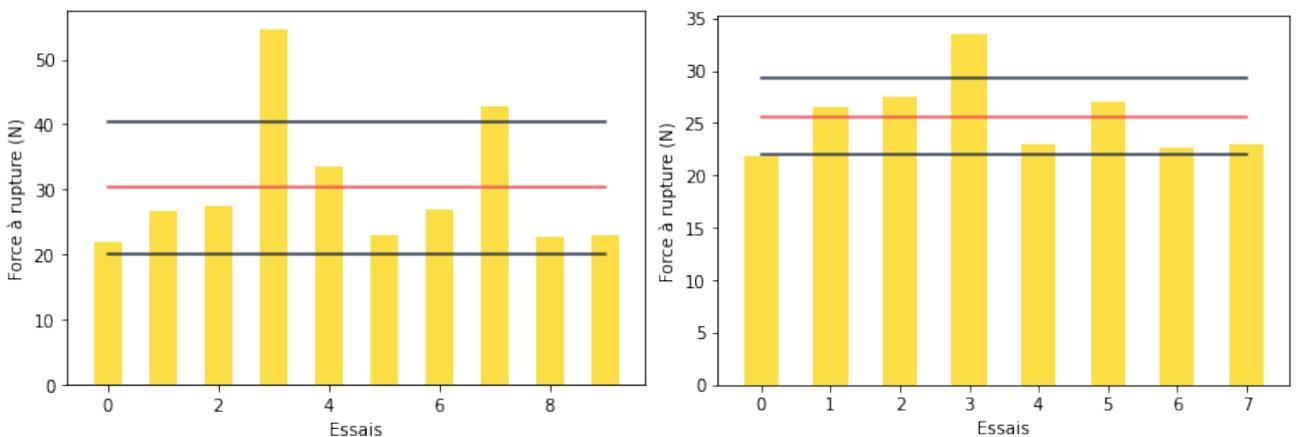


FIGURE 4 – Mesures de la force à rupture pour le filet **NF_95**. A gauche : toutes les mesures. A droite : après avoir écarté les valeurs les plus extrêmes.

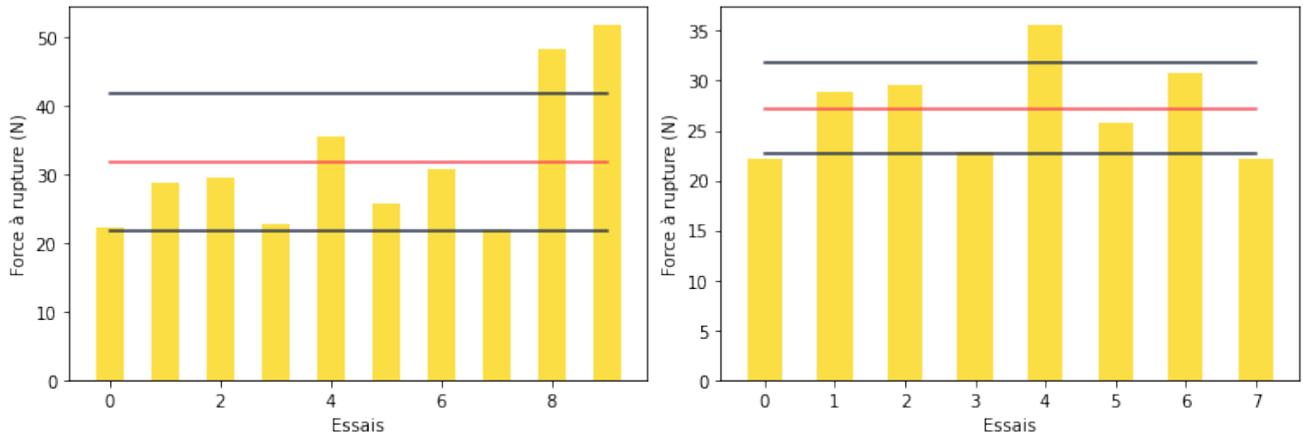


FIGURE 5 – Mesures de la force à rupture pour le filet NF_100+. A gauche : toutes les mesures. A droite : après avoir écarté les valeurs les plus extrêmes.

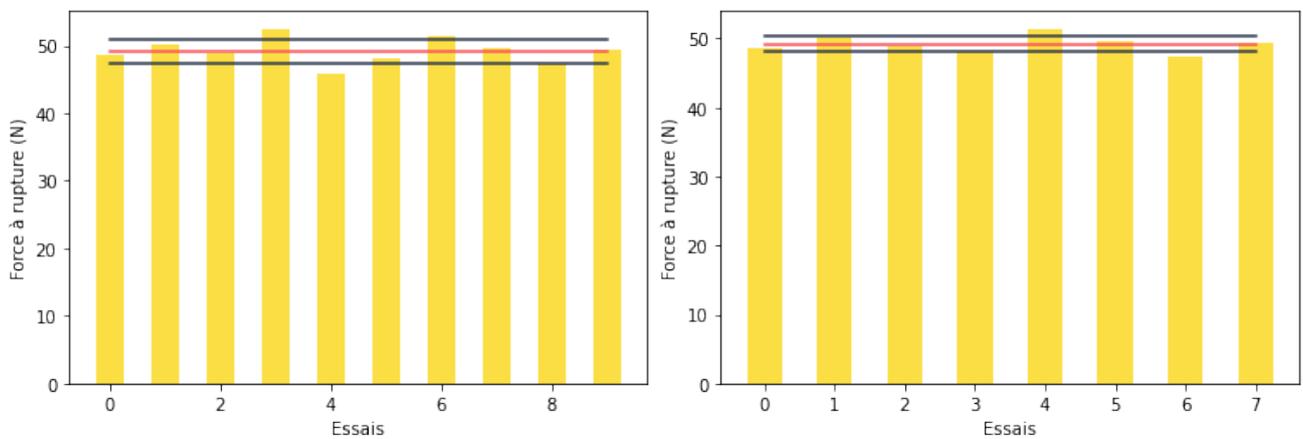


FIGURE 6 – Mesures de la force à rupture pour le filet CONV_100. A gauche : toutes les mesures. A droite : après avoir écarté les valeurs les plus extrêmes.

On obtient les résultats "révisés" suivants :

Echantillon	Force à rupture (N)
AF_95	23,1 ± 5,3
AF_100	34,1 ± 7,6
NF_95	25,6 ± 3,6
NF_100+	27,2 ± 4,5
CONV_100	49,2 ± 1,2

TABLE 2 – Force à rupture en Newton pour l'ensemble des échantillons, après avoir écarté les valeurs extrêmes.

Pour une représentation plus visuelle, on donne l'histogramme suivant :

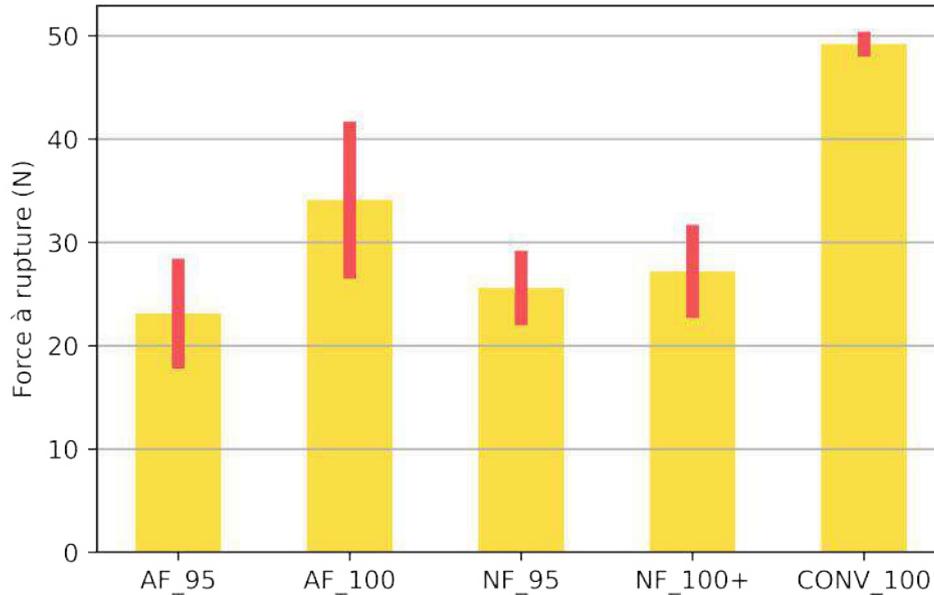


FIGURE 7 – Force à rupture (N) pour l'ensemble des échantillons (révisé)

Allongement

En procédant de manière similaire pour les valeurs d'allongements à rupture, on obtient les résultats suivants :

Echantillon	Allongement (mm)	Allongement (mm) [révisé]
AF_95	63,6 ± 10,8	62,1 ± 6,0
AF_100	72,7 ± 11,3	73,9 ± 6,1
NF_95	71,8 ± 8,4	69,5 ± 5,2
NF_100+	71,1 ± 10,6	68,5 ± 6,5
CONV_100	115,9 ± 9,9	116,6 ± 8,2

TABLE 3 – Allongement à rupture (mm) pour l'ensemble des échantillons

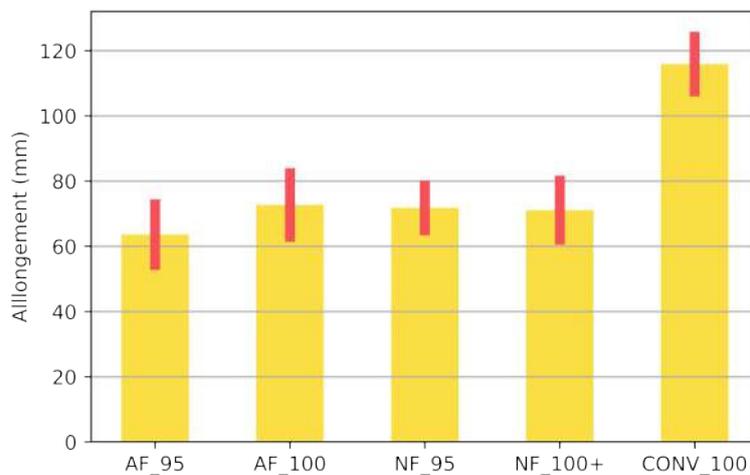


FIGURE 8 – Allongement (mm) pour l'ensemble des échantillons

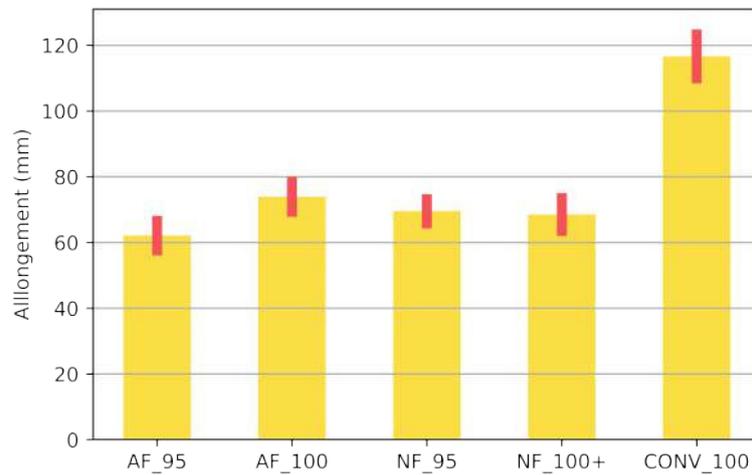


FIGURE 9 – Allongement (mm) pour l'ensemble des échantillons, après avoir écarté les valeurs extrêmes

On constate que le NF_95 se déforme un petit peu plus que l'AF_95, alors que le NF_100+ se déforme un peu moins que le AF_100. L'ensemble des filets se déforme cependant beaucoup moins que le filet "conventionnel" : on a quasiment un facteur 2 entre la déformation du filet "conventionnel" par rapport aux autres.

Profil de rupture des échantillons

Filets compostables et biosourcés

A chaque essai, les échantillons provenant des filets compostables et biosourcés cassaient au niveau des noeuds latéraux⁴ (100% des échantillons).

Filets "conventionnels"

Les filets "conventionnels" ont présenté différents emplacements de rupture : noeuds latéraux (4 échantillons sur 10), noeuds aviaux (3 échantillons sur 10), et au niveau des filins (donc pas au niveau des noeuds, 4 échantillons sur 10)

4. Une image d'un échantillon après rupture est disponible en annexe

Annexe

Placement des filets dans la machine de traction

Les filets ont été placés de la manière suivante dans la machine de traction :



FIGURE 10 – Placement du filet dans la machine de traction et déroulement de l'essai jusqu'à rupture de l'échantillon



Essais de Traction sur Filets de Catinage

DERAMAUX Eloi - Centrale Nantes Etudes

29 Février 2024

Table des matières

1 Introduction	2
1.1 Nomenclature des filets	2
1.2 Liste des échantillons	2
1.3 Protocole expérimental	3
1.3.1 Appareillage	3
1.3.2 Protocole	3
2 Résultats Expérimentaux	4
2.1 Force à la rupture	4
2.2 Allongement à la rupture	5
2.3 Rappels des résultats obtenus par idéSYS en Juin 2022	7
3 Analyses des résultats	8
3.1 Impact de la durée de vieillissement en mer	8
3.1.1 NF_95(idéSYS)/NF_95_A_6/NF_95_A_12	8
3.1.2 NF_95(idéSYS)/NF_95_B_6/NF_95_B_12	9
3.1.3 NF_95(idéSYS)/NF_95_C_6/NF_95_C_12	9
3.1.4 NF_100+(idéSYS)/NF_100+_A_6	10
3.1.5 NF_100+(idéSYS)/NF_100+_B_6/NF_100+_B_12	11
3.1.6 NF_100+(idéSYS)/NF_100+_C_6/NF_100+_C_12	11
3.1.7 Conclusions	12
3.2 Impact de la localisation	12
3.2.1 NF_95_A_6/NF_95_B_6/NF_95_C_6	12
3.2.2 NF_95_A_12/NF_95_B_12/NF_95_C_12	13
3.2.3 NF_100+_A_6/NF_100+_B_6/NF_100+_C_6	14
3.2.4 NF_100+_B_12/NF_100+_C_12	15
3.2.5 Conclusions	15
3.3 Impact de la taille des filets	16
3.3.1 Impact de la taille des filets sur la force de rupture	16
3.3.2 Tous les filets NF100+	17
3.3.3 Conclusion	17

1 Introduction

L'étude menée aujourd'hui a pour vocation d'établir les propriétés mécaniques de filets de catinage de différentes tailles, ayant passé 6 ou 12 mois en mer. Ces filets ont été laissés à trois localisations distinctes, que nous noterons A, B et C.

En particulier, nous allons déterminer la force à la rupture, ainsi que l'allongement à la rupture de ces filets. Pour cela nous allons réaliser des essais de traction sur les filets (voir Protocole Expérimental). Nous comparerons les résultats obtenus, avec ceux fournis par l'étude menée par idéSYS en juin 2022. Cela permettra de déterminer l'impact de la durée de vieillissement en mer, de la localisation des filets, et de leur taille, sur leurs propriétés mécaniques.

1.1 Nomenclature des filets

Les filets étudiés ont été produits en Avril 2022 avec les nouvelles filières en taille 95 et 100+. Les filets seront nommés de la manière suivante :

Initiales du types de filet _ taille du filet _ Lettre de la zone d'exposition (A, B ou C) _ Nombre de mois de vieillissement en mer.

Exemple : le nouveau filet en taille 100+ vieilli 6 mois en zone A sera nommé : NF_100+_A_6.

1.2 Liste des échantillons

1. Zone A :

NF_95_A_6	(1)
NF_95_A_12	(2)
NF_100+_A_12	(3)

2. Zone B :

NF_95_B_6	(4)
NF_95_B_12	(5)
NF_100+_B_6	(6)
NF_100+_B_12	(7)

3. Zone C :

NF_95_C_6	(8)
NF_95_C_12	(9)
NF_100+_C_6	(10)
NF_100+_C_12	(11)

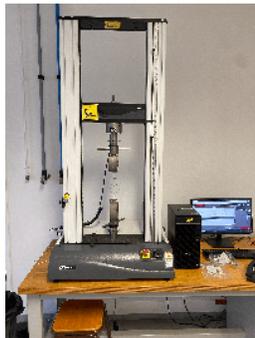
1.3 Protocole expérimental

1.3.1 Appareillage

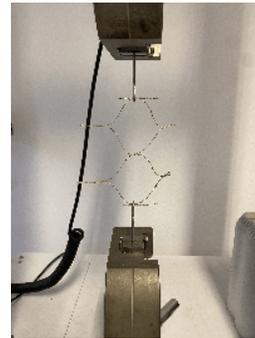
Nous avons utilisé pour ces expérimentations une machine INSTRON (modèle 3400), capable d'exercer une charge de 50 kN. Cette machine est relié au logiciel BlueHill.

1.3.2 Protocole

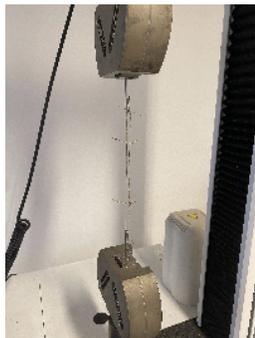
Nous avons suivi le même protocole expérimental que idéSYS, afin que les résultats obtenus soient cohérents. Nous avons remis leur protocole dans le dossier qui vous sera rendu. Les réglages les plus importants sont : Précharge de 0,05 N, Vitesse de précharge de 100 mm/min. Chaque filet, appelé aussi échantillon, fera l'objet de 8 essais de traction, afin de déterminer correctement les incertitudes de mesures. Voyez-ci dessous quelques photos :



(a) Machine et Logiciel utilisés



(b) Échantillon avant essai de traction



(c) Échantillon en fin d'essai de traction



(d) Échantillon cassé

FIGURE 1

Remarque : Tous les échantillons se sont cassés au niveau des noeuds latéraux (voir 1d).

2 Résultats Expérimentaux

2.1 Force à la rupture

Les 8 essais de traction par échantillons permettent d'établir la force à la rupture moyenne pour chacun des échantillons, ainsi que d'y joindre une incertitude, ici l'écart type (voir 2).

Nom de l'échantillon	Force à la rupture moyenne	Écart-type
NF_95_A_6	15,5	4,7
NF_95_A_12	10,6	2,81
NF_100+_A_6	12,7	4,23
NF_95_B_6	23	5,68
NF_95_B_12	20,4	6,33
NF_100+_B_6	19,1	5,59
NF_100+_B_12	10,9	2,96
NF_95_C_6	14,2	4,38
NF_95_C_12	15,3	5,89
NF_100+_C_6	17,2	5,95
NF_100+_C_12	14,4	3,99

FIGURE 2 – Tableau de valeurs des forces à la rupture (en N) de tous les échantillons

Afin de visualiser plus facilement ces résultats, nous pouvons les représenter avec l'histogramme suivant (3), les incertitudes étant représentées par les barres d'erreurs en jaune.

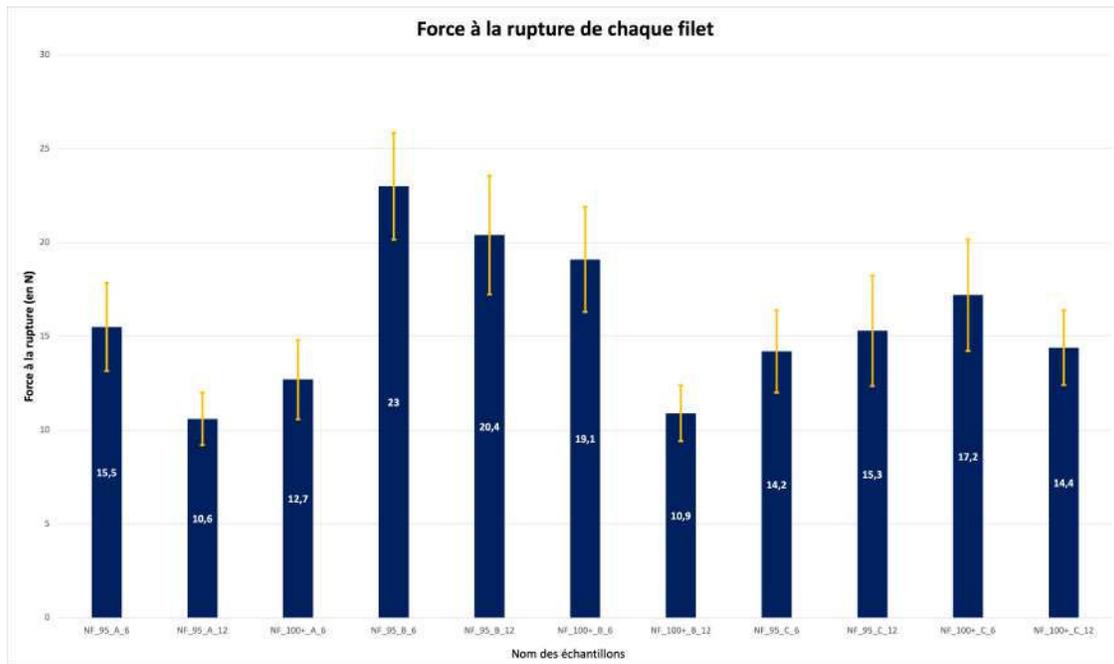


FIGURE 3 – Histogramme des forces à la rupture (en N) de tous les échantillons

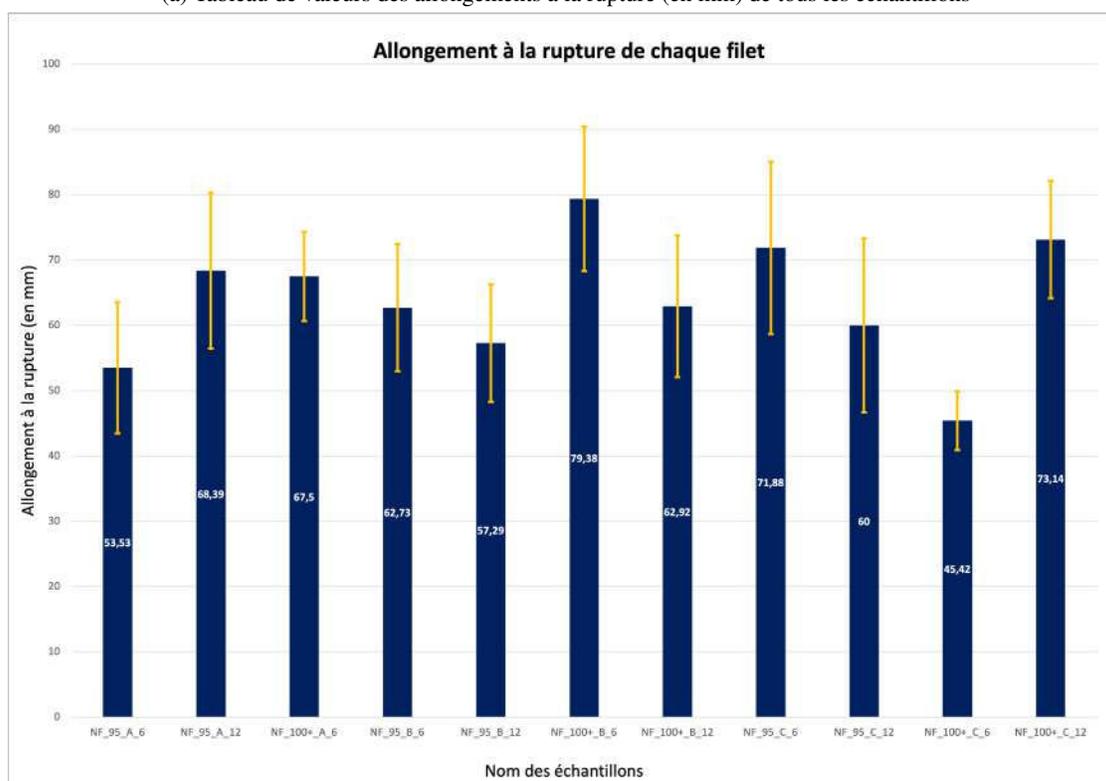
Les incertitudes, bien que relativement importantes, sont assez faibles pour considérer ces résultats expérimentaux comme satisfaisants et exploitables.

2.2 Allongement à la rupture

De la même manière, nous avons pu établir l'allongement à la rupture, ainsi que l'incertitude sur la mesure (toujours l'écart type). Voici les résultats expérimentaux obtenus :

Nom de l'échantillon	allongement à la rupture moyen (en mm)	écart-type
NF_95_A_6	53,53	20,08
NF_95_A_12	68,39	23,83
NF_100+_A_6	67,5	13,68
NF_95_B_6	62,73	19,48
NF_95_B_12	57,29	18,03
NF_100+_B_6	79,38	22,1
NF_100+_B_12	62,92	21,69
NF_95_C_6	71,88	26,4
NF_95_C_12	60	26,66
NF_100+_C_6	45,42	8,99
NF_100+_C_12	73,14	17,94

(a) Tableau de valeurs des allongements à la rupture (en mm) de tous les échantillons



(b) Histogramme des allongements à la rupture (en mm) de tous les échantillons

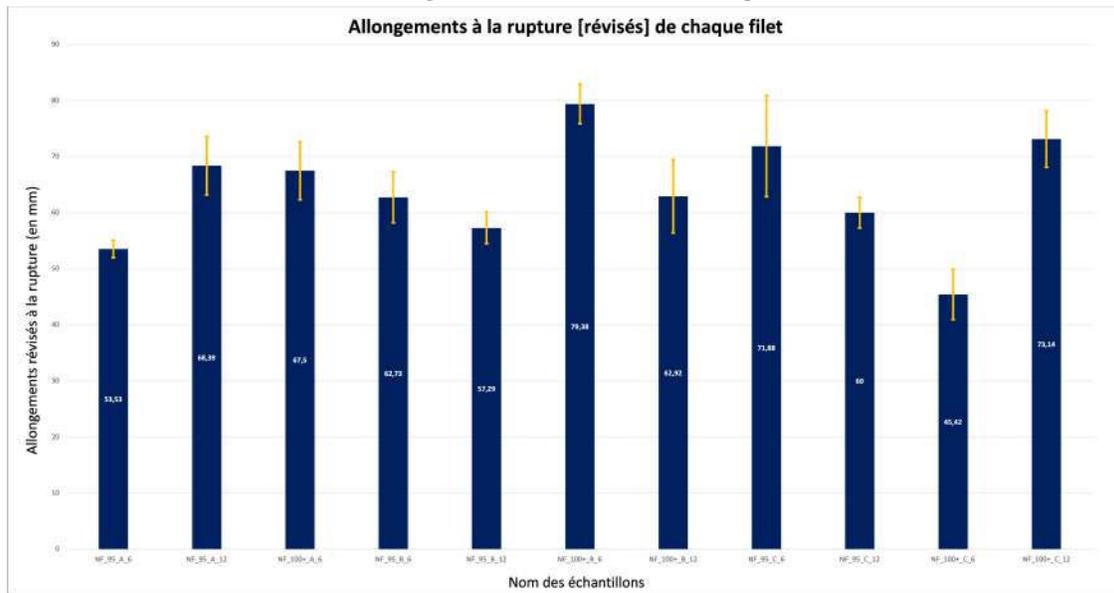
FIGURE 4 – Allongement à la rupture de tous les échantillons

Nous remarquons ici que l'incertitude sur l'allongement à la rupture est particulièrement important. Ceci pourrait s'expliquer par la variabilité assez importante de la taille des mailles d'un même filet.

Cela rend les résultats obtenus difficilement exploitables. Pour palier ce problème, nous avons pris la décision d'écarter les valeurs les plus extrêmes. Nous garderons au minimum 6 mesures par échantillon, ce qui est suffisant pour l'étude statistique des essais de traction. Voici alors les résultats "révisés" de l'allongement à la rupture, que nous utiliserons pour la suite des analyses :

Nom de l'échantillon	Allongement à la rupture moyen (en mm)	écart-type
NF_95_A_6	42,78	3,105
NF_95_A_12	50,07	10,43
NF_100+_A_6	61,95	10,35
NF_95_B_6	55,3	9,045
NF_95_B_12	51,19	5,67
NF_100+_B_6	71,91	7,03
NF_100+_B_12	60,84	13,07
NF_95_C_6	60,28	18,05
NF_95_C_12	45,83	5,45
NF_100+_C_6	45,42	8,98
NF_100+_C_12	65,3	10,05

(a) Allongements [révisés] (en mm) à la rupture



(b) Histogramme des allongements [révisés] (en mm) à la rupture

FIGURE 5 – Allongement à la rupture [révisé] (en mm) de tous les échantillons

On observe ici qu'en excluant les résultats extrêmes pour chaque échantillons, nous baissions considérablement l'incertitude sur les mesures. Cela permet d'avoir des résultats plus fiables, et donc plus exploitables pour l'analyse.

2.3 Rappels des résultats obtenus par idéSYS en Juin 2022

Nous allons dans la suite devoir utiliser les résultats donnés par idéSYS dans leur rapport de Juin 2022. Afin de simplifier la lecture d'analyse des résultats, nous allons redonner ce qui avait été établi alors.

nom de l'échantillon	force à la rupture moyenne (résultats révisés) en N	écart-type force	allongement à la rupture moyen (résultats révisés) en mm	écart-type allongement
AF_95	23,1	5,3	62,1	6
AF_100	34,1	7,6	73,9	6,1
NF_95	25,6	3,6	69,5	5,2
NF_100+	27,2	4,5	68,5	6,5
CONV_100	49,2	1,2	116,6	8,2

FIGURE 6 – Résultats établis par idéSYS

Nous pouvons remarquer qu'à première vue, les ordres de grandeurs des forces et allongements établis par idéSYS et les nôtres sont proches, ce qui est rassurant.

3 Analyses des résultats

3.1 Impact de la durée de vieillissement en mer

3.1.1 NF_95(idéSYS) / NF_95_A_6 / NF_95_A_12

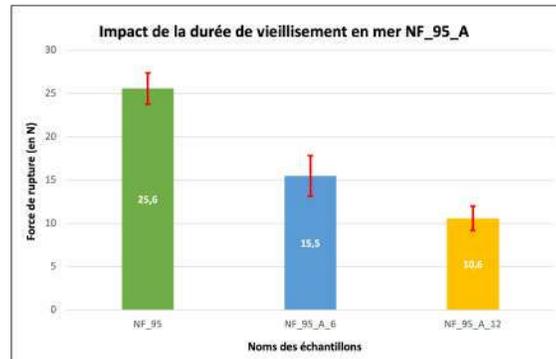


FIGURE 7 – Impact de la durée de vieillissement en mer sur la force de rupture de NF_95_A

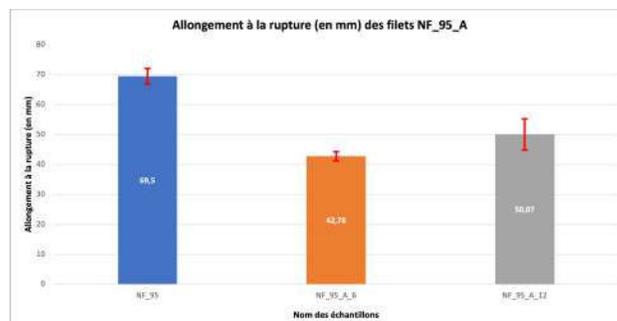


FIGURE 8 – Impact de la durée de vieillissement en mer sur l’allongement de NF_95_A

Nous observons très clairement sur la Figure 7 que l'échantillon NF_95_A se fragilise lorsqu'il passe du temps en mer. Au bout d'un an, la force de rupture est 2,5 fois plus faible qu'à la date de production. Au niveau de l'allongement du filet, on observe au bout de 6 mois une forte diminution de l'allongement à la rupture, avant une légère augmentation au bout d'un an.

3.1.2 NF_95(idéSYS) / NF_95_B_6 / NF_95_B_12

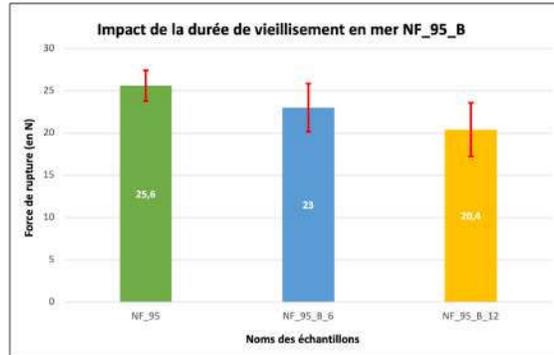


FIGURE 9 – Impact de la durée de vieillissement en mer sur la force de rupture de NF_95_B

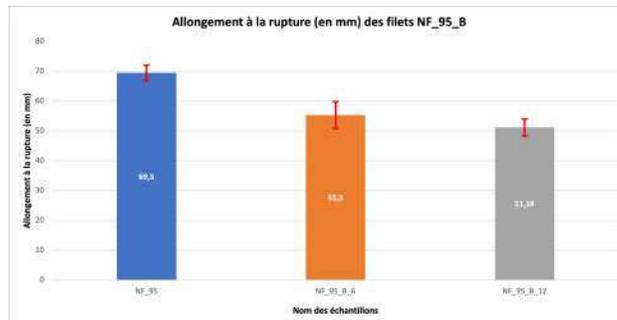


FIGURE 10 – Impact de la durée de vieillissement en mer sur l’allongement de NF_95_B

De la même manière que pour NF_95_A, le filet NF_95_B semble se fragiliser alors qu’il reste en mer. Cela est tout de même beaucoup moins important ici, le filet ne perdant que 20% de solidité après un an passé en mer (voir Figure 9). Pour l’allongement à la rupture, on observe une diminution tout au long de l’année passée en mer (chute d’environ 26% au bout d’un an).

3.1.3 NF_95(idéSYS) / NF_95_C_6 / NF_95_C_12

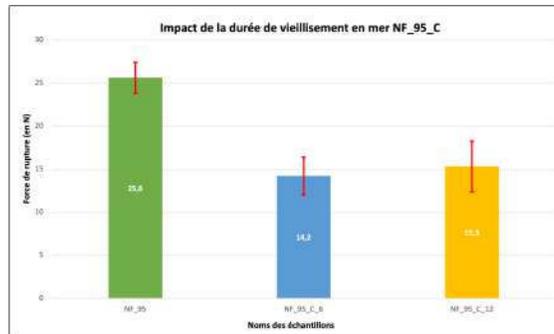


FIGURE 11 – Impact de la durée de vieillissement en mer sur la force de rupture de NF_95_C

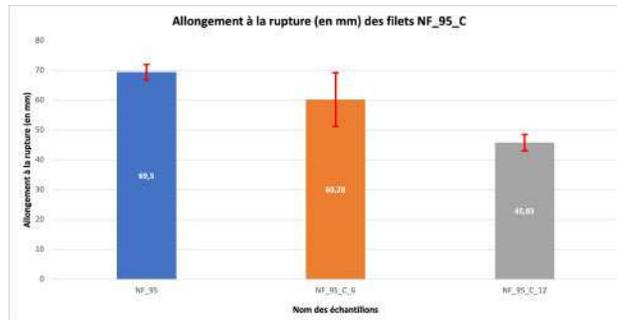


FIGURE 12 – Impact de la durée de vieillissement en mer sur l’allongement de NF_95_C

Dans le cas du filet NF_95_C, on semble voir sur la Figure 11 une chute importante de la solidité du filet au bout de 6 mois (diminution de 40%), mais peu de changement sur les 6 mois suivant (la légère augmentation que l’on voit est due aux imprécisions sur la mesure). De la même manière que pour NF_95_B, ce filet perd en allongement à la rupture au fil des mois passés en mer ((chute d’environ 34% au bout d’un an).

3.1.4 NF_100+(idéSYS) / NF_100+_A_6

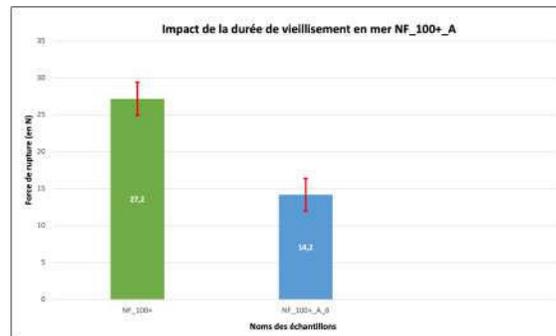


FIGURE 13 – Impact de la durée de vieillissement en mer sur la force de rupture de NF_100+_A

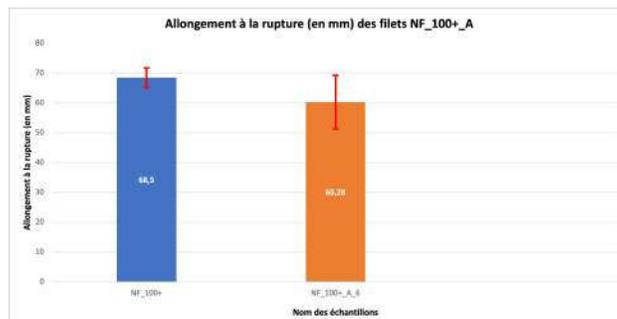


FIGURE 14 – Impact de la durée de vieillissement en mer sur l’allongement de NF_100+_A

On observe (Fig. 13) une chute de plus de 50% de la force à la rupture du filet NF_100+_A au bout de 6 mois. De même, ce filet perd en allongement à la rupture au bout de 6 mois (assez faible ici, 12% au bout de 6 mois).

3.1.5 NF_100+(idéSYS) / NF_100+_B_6 / NF_100+_B_12

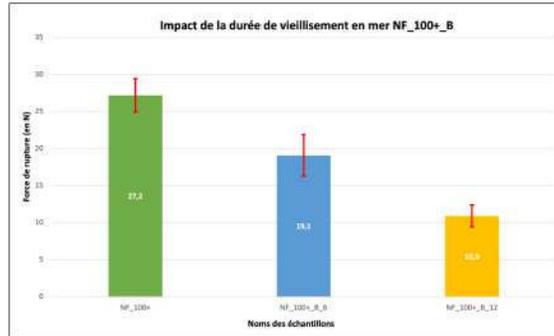


FIGURE 15 – Impact de la durée de vieillissement en mer sur la force de rupture de NF_100+_B

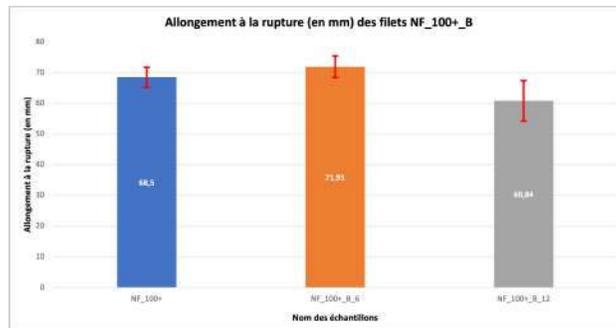


FIGURE 16 – Impact de la durée de vieillissement en mer sur l’allongement de NF_100+_B

Nous observons ici aussi une chute de la force à la rupture lors du vieillissement en mer, de 30% au bout de 6 mois et de 60% au bout d’un an. L’allongement à la rupture demeure stable sur les 6 premiers mois (légère augmentation due aux imprécisions sur la mesure), mais diminue au bout d’un an (chute d’environ 11%).

3.1.6 NF_100+(idéSYS) / NF_100+_C_6 / NF_100+_C_12

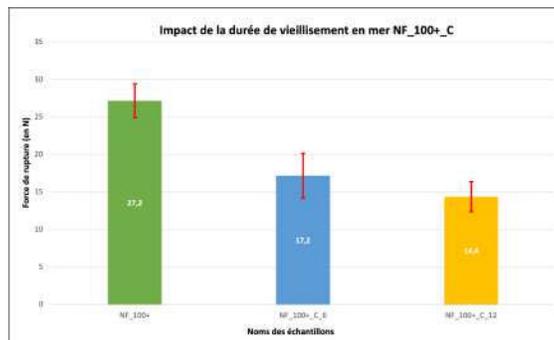


FIGURE 17 – Impact de la durée de vieillissement en mer sur la force de rupture de NF_100+_C

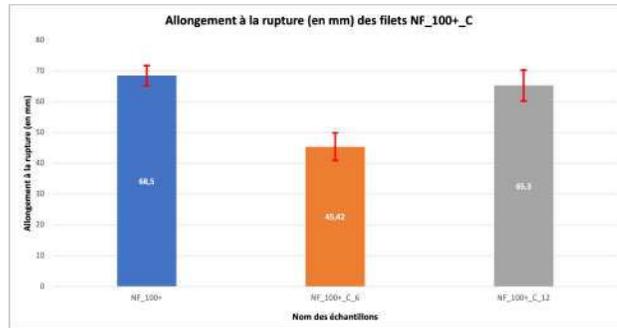


FIGURE 18 – Impact de la durée de vieillissement en mer sur l’allongement de NF_100+_C

Une fois de plus, on observe que plus le filet passe de temps en mer, et plus la force à appliquer pour sa rupture diminue. Nous observons ici une diminution importante de l’allongement à la rupture au bout de 6 mois, mais voyons ensuite le filet presque revenir aux niveaux de production au bout d’un an, ce qui est assez étonnant.

3.1.7 Conclusions

Les résultats établis nous montrent que pour chacun des filets, plus la durée de vieillissement en mer est grande, et plus la force à la rupture diminue. Cette diminution de la force à la rupture dépend également de la localisation du filet et de sa taille, ce que nous allons voir maintenant. L’allongement à la rupture a tendance à diminuer avec le temps passé en mer (sauf pour l’échantillon NF_100+_C qui présente une exception). Plus généralement, il est clair que la durée de vieillissement en mer a un impact direct sur les propriétés mécaniques des filets.

3.2 Impact de la localisation

3.2.1 NF_95_A_6 / NF_95_B_6 / NF_95_C_6

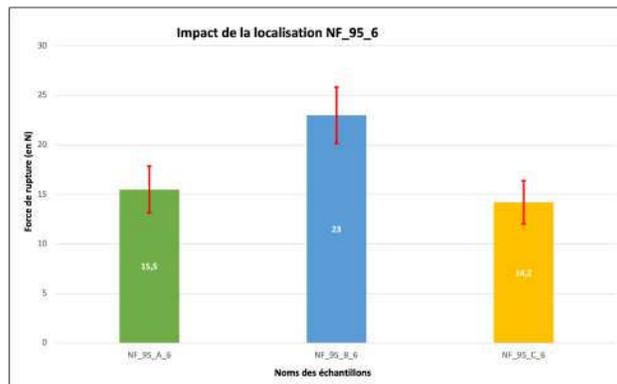


FIGURE 19 – Impact de la localisation sur la force de rupture de l’échantillon l’échantillon NF_95_6

On observe sur la Figure 19 que c’est au niveau de la Zone B que la force à la rupture du filet NF_95_6 diminue le moins, alors qu’on observe une diminution importante, et équivalente, au niveau des zones A et C.

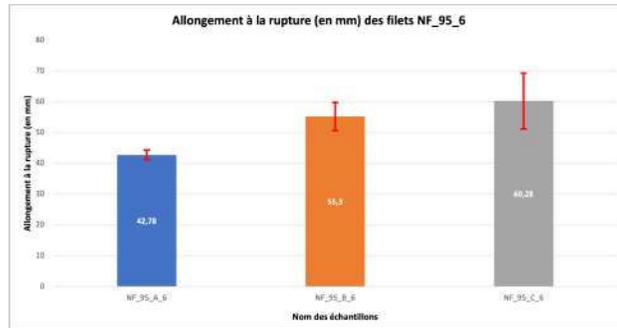


FIGURE 20 – Impact de la localisation sur l’allongement de NF_95_6

La diminution de l’allongement à la rupture est la plus importante en Zone A, et la moins importante en zone C, pour le filet NF_95_6.

3.2.2 NF_95_A_12 / NF_95_B_12 / NF_95_C_12



FIGURE 21 – Impact de la localisation sur la force de rupture de l’échantillon NF_95_12

Pour le filet NF_95_12 on observe la même tendance que pour NF_95_6, soit que la force de rupture est la moins affectée en zone B.

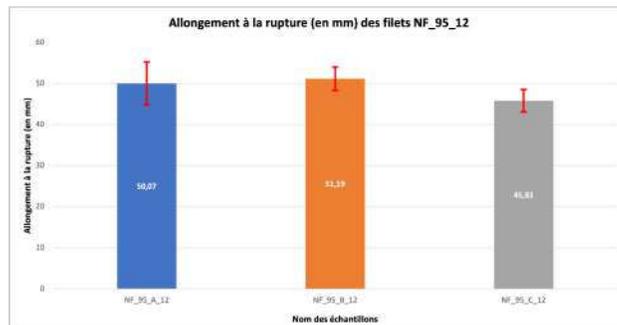


FIGURE 22 – Impact de la localisation sur l’allongement de NF_95_12

La perte d’allongement à la rupture est légèrement plus importante en zone C, mais très équivalente en zone A et B.

3.2.3 NF_100+_A_6 / NF_100+_B_6 / NF_100+_C_6

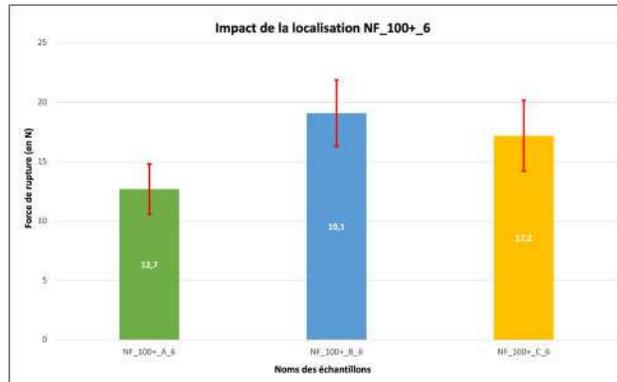


FIGURE 23 – Impact de la localisation sur la force de rupture de l'échantillon NF_100+_6

On observe cette fois encore que c'est en zone B que la diminution de la force de rupture est la moins importante. On observe également que la diminution de la force de rupture en zone C est moins conséquente que pour les deux filets précédents.

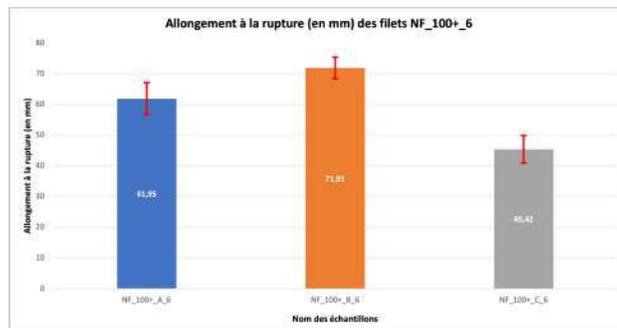


FIGURE 24 – Impact de la localisation sur l'allongement de NF_100+_6

On observe pour le filet NF_100+_6 que l'allongement à la rupture est le moins affecté en zone B, mais diminue de manière importante en zone C.

3.2.4 NF_100+_B_12 / NF_100+_C_12

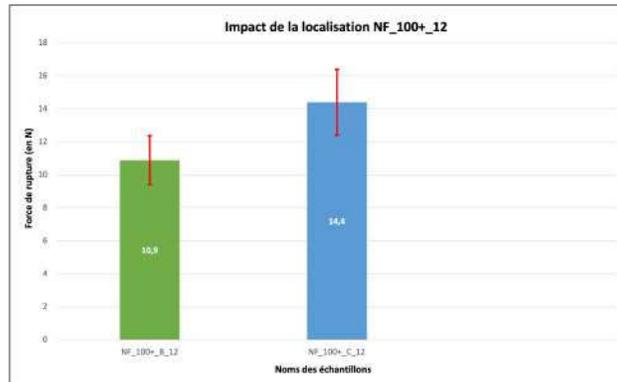


FIGURE 25 – Impact de la localisation sur la force de rupture de l'échantillon NF_100+_12

De manière étonnante, on observe sur figure 25 que la diminution de la force de rupture est moins importante en zone C qu'en zone B.

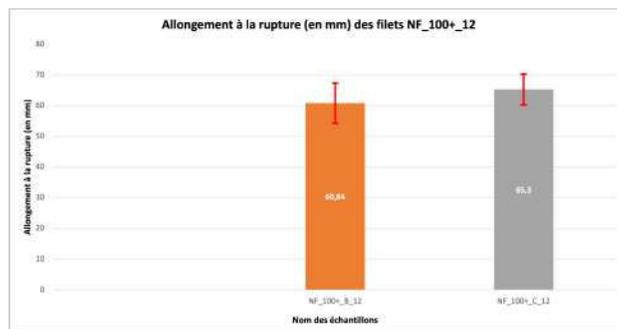


FIGURE 26 – Impact de la localisation sur l'allongement de NF_100+_12

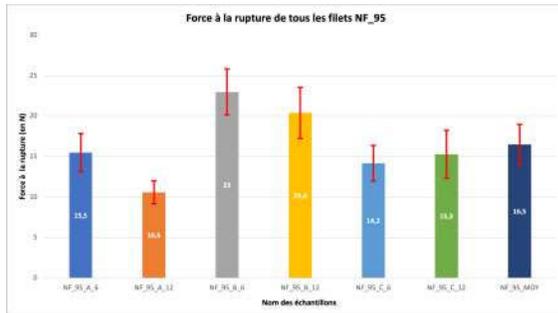
Il n'y en revanche pas beaucoup de différence sur l'allongement à la rupture sur les zones B et C pour le filet NF_100+_12.

3.2.5 Conclusions

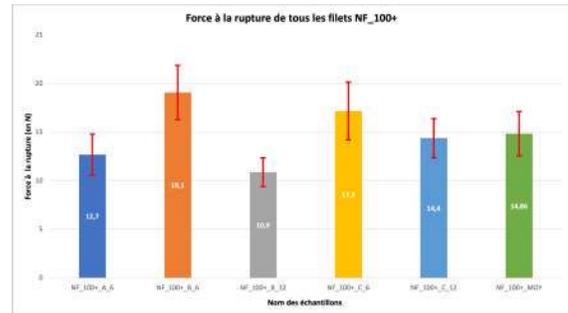
Les résultats expérimentaux nous montrent que la zone B est celle qui impacte le moins la force de rupture des filets. En revanche, les résultats sur l'allongement sont moins généraux, il faut donc voir au cas par cas, même si la zone B a une légère tendance à moins affecter l'allongement des filets. Plus généralement, les disparités dans les résultats obtenus prouvent que la localisation des filets a un impact sur leurs propriétés mécaniques.

3.3 Impact de la taille des filets

3.3.1 Impact de la taille des filets sur la force de rupture



(a) filets NF_95



(b) filets NF_100+

FIGURE 27 – Impact de la taille des filets sur la force de rupture

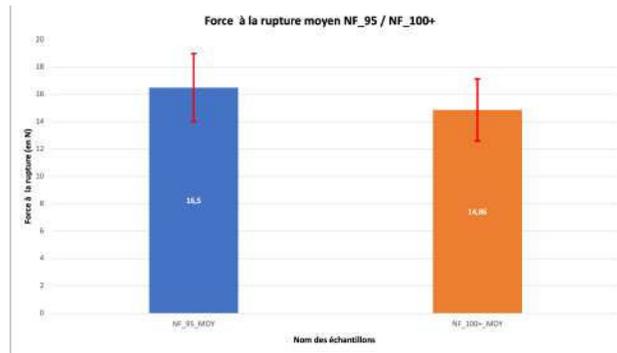
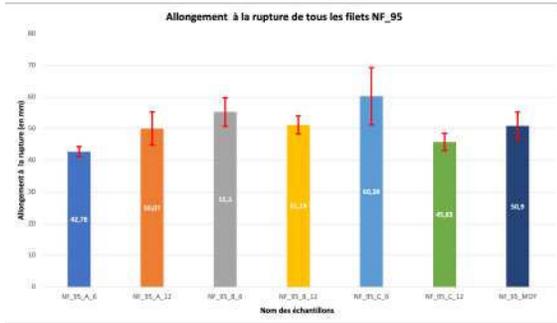


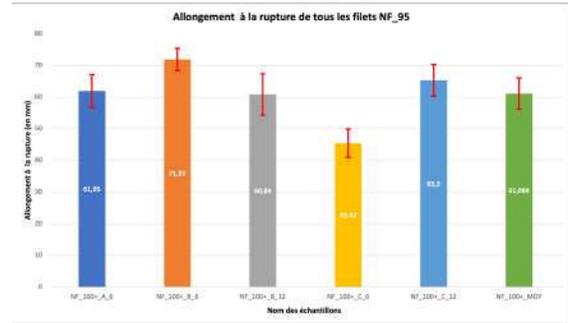
FIGURE 28 – Comparaison des forces de rupture moyennes entre NF_95 et NF_100+

Les moyennes des forces de rupture de tous les filets NF_95 et NF_100+ sont notées respectivement NF_95_MOY et NF_100+_MOY. Leur comparaison sur le Graphique 28 montre qu'en moyenne, les filets NF_100+ ont des forces de rupture plus basses que les filets NF_95. De plus, nous avons que la force à la rupture de NF_95(idéSYS) est inférieure à la force de rupture de NF_100+(idéSYS). Ainsi, les filets NF_100+ sont plus affectés que les NF_95.

3.3.2 Tous les filets NF100+



(a) filets NF_95



(b) filets NF_100+

FIGURE 29 – Impact de la taille des filets sur l’allongement de rupture

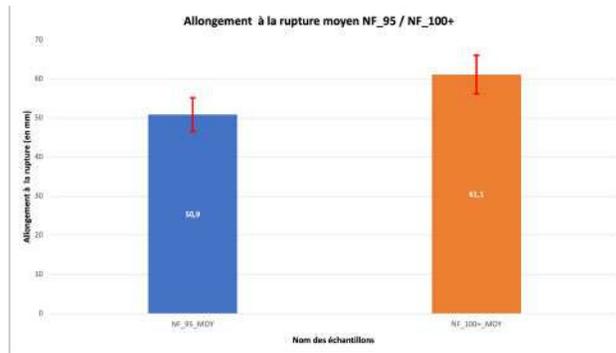


FIGURE 30 – Comparaison des allongements de rupture moyennes entre NF_95 et NF_100+

Les moyennes des allongements de rupture de tous les filets NF_95 et NF_100+ sont notées respectivement NF_95_MOY et NF_100+_MOY. Leur comparaison sur le Graphique 30 montre qu’en moyenne, les filets NF_100+ ont des allongements à la rupture plus importants que les filets NF_95. De plus, nous avons que l’allongement à la rupture de NF_95(idéSYS) est supérieur à l’allongement à la rupture de NF_100+(idéSYS). Ainsi, les filets NF_95 sont plus affectés que les NF_100+.

3.3.3 Conclusion

Cette dernière permet de démontrer deux choses. D’abord que la force à la rupture des filets NF_95 est moins affectée que celle des filets NF_100+ après avoir passé du temps en mer. D’autre part, que l’allongement à la rupture des filets NF_100+ est moins affecté que celui des filets NF_95. Il faut donc voir quel critère on privilégie lors de la pose des filets.



ETUDE DE LA COMPOSTABILITE EN COMPOSTEUR ELECTROMECHANIQUE DE FILETS DE CATINAGE BIODEGRADABLES



Pierre CRISPATZU
Consultant Economie Circulaire
15, rue de Milan
75 009 PARIS
Tél : +33 (0)6 50 52 66 73

Rapport version finale du 07/07/2023

REFERENCE APESA : 7012

Contacts APESA :

Camille LAGNET
Camille.lagnet@apesa.fr
06 26 54 12 54

SOMMAIRE

1	CONTEXTE ET OBJECTIFS.....	5
2	MATERIEL.....	6
2.1	COMPOSTEUR ELECTROMECHANIQUE	6
2.2	COMPOSTEUR DE MATURATION	8
3	PROTOCOLE DE SUIVI.....	9
4	COMPOSITION DES RATIONS.....	11
4.1	NATURE, PREPARATION ET CARACTERISATION DES CO-SUBSTRATS	11
4.1.1	LES FILETS DE CATINAGE	11
4.1.2	LES BIODECHETS	12
4.1.3	LES DECHETS VERTS	12
4.2	COMPOSITION DES RATIONS ET PHASAGE DE L'ESSAI.....	13
5	SUIVI DU COMPOSTAGE.....	14
5.1	COMPORTEMENT MECANIQUE DES FILETS EN COMPOSTAGE	14
5.2	DEROULEMENT DU COMPOSTAGE	16
6	DESINTEGRATION DES FILETS.....	18
7	QUALITE DU COMPOST	19
7.1	COMPOSITION BIOCHIMIQUE.....	20
7.2	INNOCUITE	21
7.2.1	METAUX	21
7.2.2	ANALYSES MICROBIOLOGIQUES DU COMPOST	21
7.2.3	PHYTOTOXICITE	22
8	CONCLUSIONS.....	25

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Composteur électromécanique.....	6
Figure 2 : Caractéristiques techniques du composteur électromécanique (sources TIDY PLANET)	7
Figure 3 : Dimensions du composteur électromécanique	7
Figure 4 : Disposition des résistances de chauffage et de sondes de température.....	7
Figure 5 : Températures observées en fonction des réglages	8
Figure 6 : Composteurs de maturation	8
Figure 7 : Schéma du déroulement du compostage	9
Figure 8 : Aspect visuel des biodéchets.....	12
Figure 9 : Aspect visuel du déchet vert	13
Figure 10 : Intégration des filets lors de la première découpe sur 2 jours	14
Figure 11 : Découpe des filets [A : 1 ^{er} découpe ; B : 2 ^{eme} découpe]	15
Figure 12 : Evolution visuelle de la matière	15
Figure 13 : Suivi de la température au cours du compostage et de la maturation.....	16
Figure 14 : Evolution de la matière au cours du compostage et de la maturation.....	17
Figure 15 : Bilan de désintégration des filets	18
Figure 16 : Visuels des filets restants après maturation [(A : LOT1 ; B :LOT2)].....	19
Figure 17 : Aspect visuel des plantes lors de la récolte.....	22
Figure 18 : Résultat essai de phytotoxicité sur blé et cresson	23
Tableau 1 : Opération et fréquence de suivi composteur électromécanique	10
Tableau 2 : Déroulement des essais.....	10
Tableau 3 : Composition biochimique des filets	11
Tableau 4 : Caractéristiques des biodéchets.....	12
Tableau 5 : Caractéristiques du déchets vert.....	13
Tableau 6 : Proportions théoriques et réelles des différentes phases	13
Tableau 7 : Composition des rations testées	14
Tableau 8 : Caractérisation des rations et des lots testées.....	14
Tableau 9 : Teneurs en ETM des composts.....	21
Tableau 10 : Analyses des paramètres microbiologiques des composts	21
Tableau 11 : Bilan des analyses de caractérisation des composts	24

ABBREVIATIONS

DV	Déchets Verts
ETM	Eléments Traces Métalliques
H	Humidité
Max	Valeur Maximale
Med	Valeur Médiane
Min	Valeur Minimale
MM	Matière Minérale (teneur en cendre après calcination à 550°C - NF EN 15169)
Moy	Valeur Moyenne
MS	Matière sèche (séchage à masse constante à 105°C - NF EN 14346)
MSV	Matière sèche volatile (mesure par calcination à 550°C - NF EN 15169. Assimilable à la matière organique si la teneur en matière organique d'origine synthétique - plastiques - est nulle).
NC	Non Concerné
Norg	Azote organique
NTK	Azote Kjeldahl
PB	Produit Brut
TS	Temps de séjour

1 CONTEXTE ET OBJECTIFS

UPCYCLE a été sollicité pour accompagner le SMIDAP (Syndicat Mixte pour le Développement de l'Aquaculture et de la Pêche en Pays de la Loire) dans le cadre du projet REIPLIC qui vise à développer des filets mytilicoles en plastique biodégradable en compost industriel.

Des premiers essais de désintégration ont été réalisés sur une plateforme de compostage industriels avec des résultats prometteurs.

Du fait de la difficulté d'intégrer ces filets dans des filières existantes de compostage industriel, le SMIDAP et UPCYCLE étudie la possibilité de valoriser les filets in-situ, en utilisant une solution de compostage électromécanique de co-compostage avec des biodéchets.

L'objectif de la présente étude est d'étudier la biodégradabilité des filets et la faisabilité opérationnelle dans une filière de compostage électromécanique.

Ce procédé de compostage comprend deux phases :

- Une première phase dans le composteur, d'environ deux semaines, qui concentre la phase active du compostage, caractérisé par une activité microbiologique importante, une forte augmentation de température et une forte transformation visuelle de la matière. A cette étape, la cuve du composteur est chauffée, agitée et aérée. L'alimentation et l'extraction sont continues.
- Une seconde phase réalisée dans des bacs de maturation par lot de compost. La maturation est caractérisée par une activité bactérienne plus faible et donc une température plus faible également. La matière se dégrade peu mais subit une maturation (transformation intrinsèque).

Plusieurs problématiques opérationnelles sont à valider pour la faisabilité de ce compostage :

- Les filets devront être broyés pour pouvoir être intégrés à ce compostage.
- Même après broyage, il conviendra de vérifier la faisabilité mécanique de l'intégration des filets dans le compostage (comportement par rapport aux organes d'agitation de la cuve du composteur électromécanique).
- Les filets devront être co-compostés avec des coproduits. Il convient de vérifier la proportion d'intégration des filets dans le mélange mis en compostage.
- Les températures de compostage, en composteur électromécanique, sont moindres que celle prévues dans les normes de biodégradabilité en compostage industriel. Il convient de vérifier que la biodégradation est effective à ces conditions.
- Les filets, après usage et ramassage des coquillages sont « souillés » avec des résidus marins organiques et minéraux. Il sera nécessaire de vérifier cet impact sur le compostage et la qualité du compost (salinité notamment).

2 MATERIEL

2.1 Composteur électromécanique

L'APESA dispose pour ces essais d'un composteur électromécanique TIDY PLANET A700 (Figure 1).

FIGURE 1 : COMPOSTEUR ELECTROMECHANIQUE



Le composteur électromécanique est un système de compostage in situ automatisé qui a été conçu pour transformer les déchets organiques, dont les déchets alimentaires et de jardin, en compost, de manière simple et efficace.

Le composteur permet de contrôler les conditions de compostage pour les conserver les plus optimales possibles pour la dégradation des matières.

Il s'agit d'un système de compostage continu, ce qui signifie qu'il peut être alimenté chaque jour en produits frais et ces produits avancent jusqu'à la sortie du composteur, en étant mélangés pendant le cheminement.

Les parties internes de la cuve peuvent être légèrement chauffées (deux résistances sont positionnées sur les deux premiers tiers de la cuve, la première étant d'une puissance supérieure, permettant un chauffage plus important en début de cuve, pour accélérer la mise en compostage), l'agitation peut être modulée et une aspiration assure le renouvellement du ciel gazeux. Un piquage a été adapté par l'APESA de façon à pouvoir effectuer des prélèvements de gaz dans le composteur qui pourront être analysés par chromatographie en phase gazeuse (μGC) de façon à surveiller les conditions aérobies dans le milieu.

Le volume total du composteur est de 700L pour un volume utile d'environ 350L.

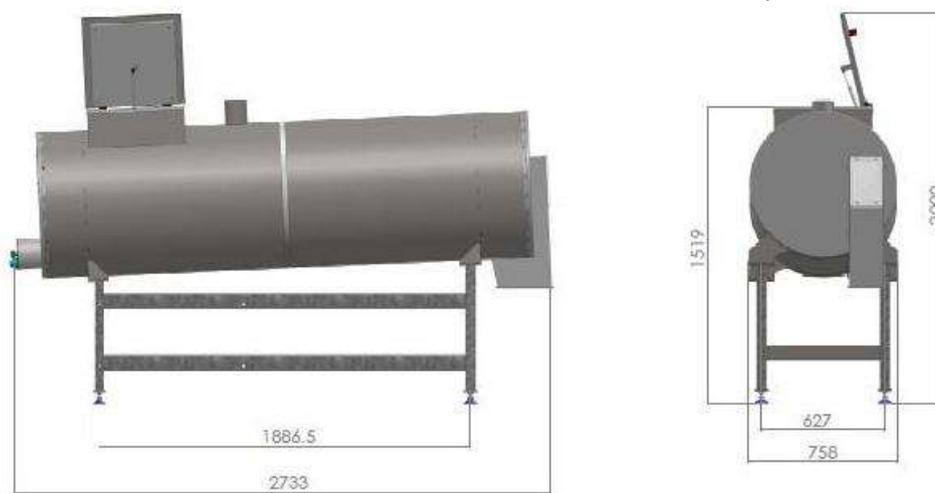
Les Figure 2 et Figure 3 présentent les caractéristiques techniques du composteur utilisé.

FIGURE 2 : CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DU COMPOSTEUR ELECTROMECHANIQUE (SOURCES TIDY PLANET)

Machine Capacities & Consumption		
Capacity (Max):	Standard Configuration Dehydra Incorporated	700 Litres Food Waste per Week* 2,100 Litres Food Waste per Week*
Electricity Consumption		25+ kWh per Week (Average)
Electrical Parameters		
Voltage		240 V
Phases		Single Phase
Frequency		50 Hz
Power		2.4 kW (Max)
Current		10 A (Max)
Dimensions & Weight		
Length		3.0 m
Width		0.9 m
Height		1.6 m
Weight		400 kg (EMPTY)
Software Version		
Installed Software:		MCI.R30-04a
Decibel Rating		
Empty Machine		60 dB at 3 m
Machine at Full Capacity		60 dB at 3 m

* Under optimum composting conditions

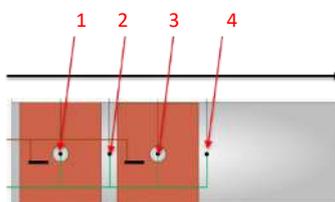
FIGURE 3 : DIMENSIONS DU COMPOSTEUR ELECTROMECHANIQUE



4 réglages sont possibles sur le composteur électromécanique :

- Le niveau de chauffage : un bouton non gradué (« Temp adjust ») permet de chauffer plus ou moins le composteur au moyen de résistances installées sur les 2/3 de la cuve.

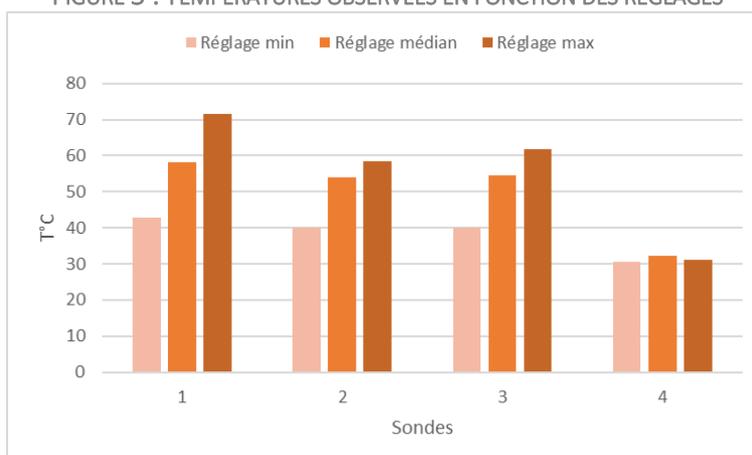
FIGURE 4 : DISPOSITION DES RESISTANCES DE CHAUFFAGE ET DE SONDES DE TEMPERATURE



Implantation des sondes de températures dans le composteur électromécanique

La Figure 5 présente les températures mesurées, dans des conditions d’essai, en fonction du réglage de température appliqué. Ces températures sont indicatives car sujettes aux conditions d’essai.

FIGURE 5 : TEMPERATURES OBSERVEES EN FONCTION DES REGLAGES



- Les essais ont été menés avec un réglage aux $\frac{3}{4}$.
- La fréquence de ventilation : le ventilateur fonctionne par défaut en continue. Un programmeur a été ajouté pour pouvoir régler son fonctionnement de façon séquentielle. La ventilation a été utilisé de façon séquentielle et fractionnée (50% du temps).
- La durée des cycles d'agitation : un bouton non gradué (« Process speed ») permet de régler ce paramètre. Les paramètres préconisés par le constructeur ont été suivis et le bouton laissé sur le marquage prévu, à « 120 ».
- La fréquence des cycles d'agitation : un bouton non gradué (« Run time ») permet de régler ce paramètre. Les paramètres préconisés par le constructeur ont été suivis et le bouton laissé sur le marquage prévu.

2.2 Composteur de maturation

En sortie du composteur électromécanique les lots de composts sont placés en maturation, par lots de production homogènes : ration, proportions, temps de séjour..., identiques. Les caissons de maturation utilisés sont des composteurs fermés, de type composteurs domestiques d'un volume de 300 litres, placés sur une dalle de béton. Une sonde de température placés au cœur permet le suivi de la température.

FIGURE 6 : COMPOSTEURS DE MATURATION

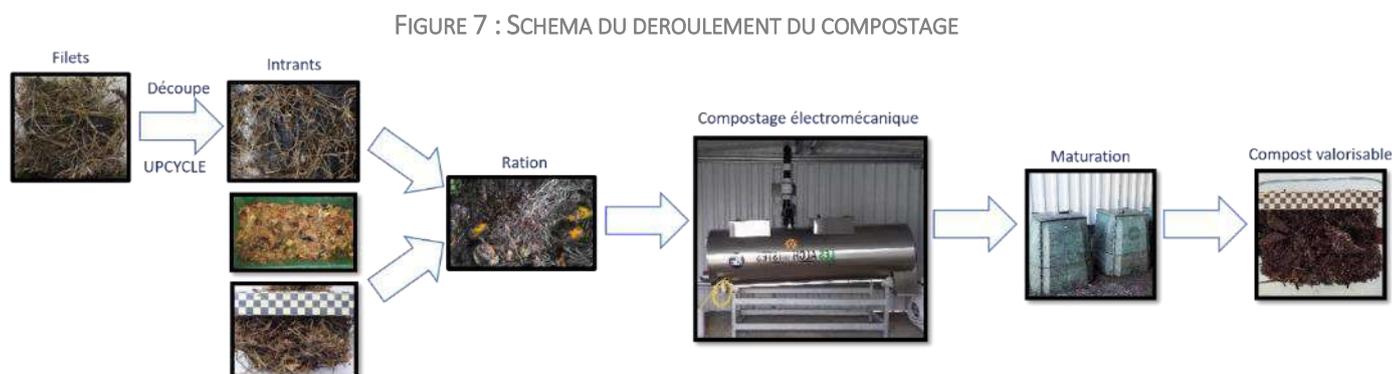


Des retournements manuels sont réalisés périodiquement.

3 PROTOCOLE DE SUIVI

Les filets après découpe, réalisée manuellement par UPCYCLE, sont introduits dans le composteur électromécanique, en mélange avec des coproduits (ration). Le compost en sortie est mis à maturation pendant 3 mois puis caractérisé.

La Figure 7 rappelle le déroulement du procédé de compostage mis en œuvre dans le cadre de ce projet.



Les paramètres habituels de caractérisation des matières et de suivi du compostage sont mesurés à différentes étapes du procédé de compostage : sur chaque intrant, sur la ration formée, sur le composteur électromécanique (point de contrôle intermédiaire via trappe d'accès et sur le compost en sortie), sur le compost en maturation et sur le compost final.

Par ailleurs, une analyse de phytotoxicité est réalisée sur les composts après maturation. Un criblage à 2 mm et la recherche de résidu de filet est réalisé après le composteur électromécanique et après maturation.

Le Tableau 1 présente les détails du protocole de suivi mis en œuvre et la planification. Ce protocole de suivi a pour objectif de caractériser et piloter le déroulement du compostage.

TABLEAU 1 : OPERATION ET FREQUENCE DE SUIVI COMPOSTEUR ELECTROMECHANIQUE

Objets	Description	Fréquence
Intrants	H/MS/MSV/MM/C/N	A chaque lot et à minima 1 fois par mois
Ration/composteur	Masse de chaque intrant composant la ration	Chaque jour ouvré
	Masse totale de la ration	Chaque jour ouvré
	Densité de la ration	Hebdomadaire
	Température du composteur	Enregistrement continu
	Composition du gaz dans le ciel gazeux (CO ₂ , O ₂ , CH ₄)	Chaque jour ouvré
Compost trappe intermédiaire	Test au poing pour appréciation humidité	Chaque jour ouvré
	H/MS/MSV/MM	Hebdomadaire
Compost sortie composteur	Masse	Chaque jour ouvré
	Test au poing pour appréciation humidité	Chaque jour ouvré
	Densité	Hebdomadaire
	H/MS/MSV/MM	Hebdomadaire
	Criblage à 2mm et recherche de résidus de filets	1 échantillon par modalité en phase stabilisée
	Mise en caisson de maturation	En phase de production uniquement
Caisson de maturation	Température	Enregistrement continu
	Retournements	Hebdomadaire le premier mois puis deux fois par mois
	Test au poing pour appréciation humidité	A chaque retournement
	Ajout d'eau si nécessaire	A chaque retournement
	H/MS/MSV/MM	deux fois par mois
	Evolution de la maturité du compost : test de respiration AT4/rottegrad	Mensuelle
Compost final	Masse	1 échantillon par modalité en phase stabilisée
	Analyses de caractérisation agronomiques, métaux selon NF U 44-051	1 échantillon par modalité en phase stabilisée
	Analyses microbiologiques	1 échantillon par modalité en phase stabilisée
	Salinité	1 échantillon par modalité en phase stabilisée
	Criblage à 2mm et recherche de résidus de filets	1 échantillon par modalité en phase stabilisée
	Essais de phytotoxicité	1 échantillon par modalité en phase stabilisée

Le composteur a étéensemencé au démarrage avec du compost issu d'un andain industriel de compostage de déchets végétaux de mois d'un mois de façon à inoculer le composteur avec une flore bactérienne aérobie active permettant un démarrage des essais rapide. Les différentes phases de tests ont ensuite été réalisées successivement.

Chaque modalité est d'une **durée totale au moins à deux fois le temps de séjour** (volume utile du composteur/volume alimentation quotidien). Elle est divisée en :

- Une **première phase dite de transition**, équivalente à au moins une fois le temps de séjour, durée nécessaire pour que le compost sortant du composteur soit représentatif de la ration introduite et non de la modalité précédente (période tampon). L'idéal aurait été de deux fois le temps de séjour, mais les délais associés auraient été trop élevés pour permettre la réalisation de plusieurs phases dans le cadre du projet.
- Puis une **seconde phase dite stabilisée** qui permet la **production d'un compost représentatif** des conditions testées. Ce compost, considéré comme le lot de compost de la modalité, est mis en **maturation**.

Les résultats fournis dans ce rapport sont ceux de la phase dite « stabilisée ».

Dans le cadre de cette étude, 2 phases ont été testées avec le déroulement suivant (Tableau 2) :

TABLEAU 2 : DEROULEMENT DES ESSAIS

Phase	Octobre		Novembre				Décembre					Janvier					Février					Mars					Avril					Mai										
	S 42	S 43	S 44	S 45	S 46	S 47	S 48	S 49	S 50	S 51	S 52	S 1	S 2	S 3	S 4	S 5	S 6	S 7	S 8	S 9	S 10	S 11	S 12	S 13	S 14	S 15	S 16	S 17	S 18	S 19	S 20	S 21										
Démarrage (17/10/2022)	Lancement																																									
P1					Composteur électromécanique					Maturation																												Phytotoxicité				
P2												Composteur électromécanique					Maturation																									Phytotoxicité

4 COMPOSITION DES RATIONS

4.1 Nature, préparation et caractérisation des co-substrats

Pour permettre le bon déroulement du procédé de compostage, la matière mise en compostage doit, d'une part avoir une composition biochimique équilibrée, et d'autre part une humidité suffisante.

Deux co-substrats ont été testés en mélange avec les filets : des déchets verts et des biodéchets. Les proportions des mélanges réalisés sont présentées au paragraphe 4.2

Les paragraphes suivants présentent la nature, les caractéristiques et la préparation des différents intrants constituant la ration.

4.1.1 Les filets de catinage

4 lots de filets ont été reçus entre le mois d'août, et le mois de septembre représentant environ 1125L de filets bruts (volume sur filets non découpés).

Un échantillon moyen représentatif des 4 lots reçus a été constitué et utilisé de façon homogène pour les deux phases d'essai (soit environ 275L de filet non coupés).

La société UPCYCLE a identifié des broyeurs capables de traiter les filets mais les prestataires n'ont pas souhaité broyer les filets souillés. Industriellement, il sera donc possible de broyer les filets en envisageant l'achat d'un broyeur adapté. Dans le cadre des essais, la découpe a été réalisée (par Upcycle de façon manuelle) afin de faciliter leur intégration au sein du composteur électromécanique, en évitant l'enroulement de ceux-ci autour de l'axe d'agitation.

Une mesure de matière sèche, de matière sèche volatile, ainsi que la détermination du rapport C/N a été réalisée sur l'échantillon global (Tableau 3).

TABLEAU 3 : COMPOSITION BIOCHIMIQUE DES FILETS

		Filets	Critères compostage
Humidité	%PB	32,7	50 à 60%
Matière sèche	%PB	67,3	40 à 50%
Matière sèche volatile	%MS	35,8	
	%PB	24,1	
Carbone organique (calculé)	%MS	17,9	
	%PB	12,0	
Matière minérale	%MS	64,2	
	%PB	43,2	
NTK	%MS	0,5	
	%PB	0,3	
C/N		37,7	10 à 40 Optimum = 30

Afin d'être compostés, les filets doivent être mélangés à une matrice organique. Les filets présentent une teneur en matière sèche élevée, 67,3%, il a donc été nécessaire d'apporter un co-substrat humide. Le C/N des filets est de 37,7 et rentre dans la fourchette acceptable. Pour se rapprocher de l'optimum de 30, il est nécessaire d'apporter un co-substrat carboné.

4.1.2 Les biodéchets

Dans une logique de filière de proximité, les filets seront compostés avec des biodéchets produits localement. Ces biodéchets ont été échantillonnés sur une plateforme de compostage de biodéchets. Il s’agit de restes de repas et de biodéchets de collectivités, échantillonnés en vrac sur une plateforme de traitement. Les déchets sont incorporés tels quels, sans broyage, dans le composteur.

FIGURE 8 : ASPECT VISUEL DES BIODECHETS



Echelle : 1 carré = 10 mm

Pour travailler sur des déchets frais et représentatifs, un nouveau lot de biodéchets a été échantillonné tous les 15 jours et stocké en chambre froide positive ($\pm 6^{\circ}\text{C}$) pendant les deux semaines d’utilisation du lot pour l’alimentation du composteur.

Les valeurs moyennes des caractéristiques de ces biodéchets pour chaque phase sont présentées au Tableau 4. Ces valeurs sont considérées pour le calcul des performances des essais de compostage.

TABLEAU 4 : CARACTERISTIQUES DES BIODECHETS

	H (%PB)	MS (%PB)	MSV (%MS)	MSV (%PB)	MM (%MS)	MM (%PB°)	Corg (%MS)	Corg (%PB)	NTK (%MS)	NTK (%PB)	C/N
P1	76,3	23,7	94,2	22,4	5,8	1,4	47,3	11,1	3,5	0,9	15,0
P2	75,0	25,0	93,3	23,5	6,8	1,6	44,9	9,7	2,5	0,7	19,9

Les biodéchets présentent une humidité élevée (environ 75%) et un C/N faible (environ 15). Pour un compostage équilibré il sera nécessaire d’ajouter un coproduit carboné.

4.1.3 Les déchets verts

Le déchet vert est donc le dernier co-substrats utilisé lors de cette étude, il est constitué de broyat de déchets végétaux (DV). Ils sont susceptibles d’être facilement mobilisables dans des filières locales de traitement de déchets.

Un lot tous les 15 jours de déchets verts a été réalisé. Ils ont été échantillonnés sur une plateforme de compostage de déchets verts issus de l’entretien d’espaces verts. Il s’agit de déchets verts frais, constitués principalement de tontes et de branchages de petites tailles (Figure 9).

FIGURE 9 : ASPECT VISUEL DU DECHET VERT



Echelle : 1 carré = 10 mm

Les valeurs moyennes des caractéristiques de ce déchet vert pour chaque phase sont présentées au Tableau 5. Ces valeurs sont considérées pour le calcul des performances des essais de compostage.

TABLEAU 5 : CARACTERISTIQUES DU DECHETS VERT

	H (%PB)	MS (%PB)	MSV (%MS)	MSV (%PB)	MM (%MS)	MM (%PB)	Corg (%MS)	Corg (%PB)	NTK (%MS)	NTK (%PB)	C/N
P1	27,3	72,7	71,0	51,6	29,0	21,1	35,5	25,8	2,0	1,4	18,2
P2	29,6	70,4	67,0	47,4	33,1	23,1	33,5	23,7	1,1	0,8	31,6

4.2 Composition des rations et phasage de l'essai

→ Phase de démarrage

Au démarrage, le composteur a été rempli de compost pour permettre un ensemencement rapide et un démarrage rapide des essais. Ces essais ont ensuite été initiés par une phase de démarrage avec un mélange de déchets verts/biodéchets, avec un temps de séjour de 15 jours. Ce mélange a permis de mettre en place la microbiologie nécessaire au lancement des essais.

→ Phases 1 / 2 : Mélange déchets verts / biodéchets / filets

Enfin, ont été testés, des mélanges de co-substrats avec les filets en différentes proportions. Ces rations ont été calculée de façon à assurer un C/N de l'ordre de 30, qui est l'optimum pour un compostage.

Le Tableau 6 présente pour chaque phase la ration calculée et réel.

TABLEAU 6 : PROPORTIONS THEORIQUES ET REELLES DES DIFFERENTES PHASES

Phases	Durée (semaines)	TS (j)	Déchets verts (% v/v)	Biodéchets (% v/v)	filets (% v/v)	C/N
1 théorique	4	15	43	43	15	
2 théorique	4	15	40	40	20	
1 réel	4	15,1	43	43	15	19,9
2 réel	4	17,2	39	39	23	28,2

On peut voir un C/N pour la phase 1 en dessous de la valeur de C/N optimal (30), il reste tout de même dans la plage satisfaisante pour un compostage qui se situe entre 10 et 40.

Le Tableau 7 et le Tableau 8 présentent la composition des mélanges de chacune des modalités testées et les caractéristiques des rations ainsi composées.

Pour rappel, les données de caractérisation moyennes sont considérées pour le calcul de la ration (Tableau 3, Tableau 4 Tableau 5).

TABLEAU 7 : COMPOSITION DES RATIONS TESTEES

LOT	Biodéchets		Déchets verts		Filets		Eau
	Masse (kg/j)	Volume (L/j)	Masse (kg/j)	Volume (L/j)	Masse (kg/j)	Volume (L/j)	Masse (kg/j)
1	7,9	9,9	1,6	9,7	0,4	3,5	2,1
2	8,3	12,1	1,9	10,0	0,6	4,7	3,1

La quantité d'eau apporté est ajustée régulièrement en fonction de l'humidité observée à l'étape intermédiaire (trappe intermédiaire) par vérification quotidienne par test au poing et par mesure hebdomadaire.

TABLEAU 8 : CARACTERISATION DES RATIONS ET DES LOTS TESTEES

LOT	Masse (kg/j)	Densité	Volume (L/j)	MS* (%PB)	MSV* (%MS)	MSV* (%PB)	C/N	TS** (j)
1	12,0	0,520	23,1	27,7	85,2	23,6	19,9	15,1
2	13,9	0,682	20,3	27,3	83,8	22,9	28,2	17,2

*MS/MSV théorique calculée à partir des MS/MSV mesurée sur chacun des intrants

**Volume utile considéré = 350L

5 SUIVI DU COMPOSTAGE

Ce paragraphe présente les résultats du suivi du compostage (phase de composteur électromécanique et phase de maturation). A noter que les résultats sont ceux des périodes stabilisées pour les deux modalités testées.

5.1 Comportement mécanique des filets en compostage

Lors des premières incorporations de filets au sein du composteur électromécanique, on a pu observer un enroulement de ces filets autour de l'axe d'agitation, empêchant ainsi l'avancement des filets au sein du composteur (Figure 10).

Malheureusement, la première découpe opérée par la société UPCYCLE n'a pas été suffisante pour limiter cette contrainte mécanique.

FIGURE 10 : INTEGRATION DES FILETS LORS DE LA PREMIERE DECOUPE SUR 2 JOURS



Pour essayer de résoudre ce problème, la société UPCYCLE a réalisé une deuxième découpe manuelle afin de diminuer la taille des filets (Figure 11).

FIGURE 11 : DECOUPE DES FILETS [A : 1^{ER} DECOUPE ; B : 2^{EME} DECOUPE]



Echelle : 1 carré = 10 mm.

Cette deuxième découpe a permis la faisabilité mécanique des essais dans des conditions optimales (avancement normal de la matière dans le composteur). Il est à noter également lors de l'augmentation de la quantité de filets pour la phase 2, le bon déroulement de l'essai sans aucune contrainte mécanique.

Une fois la contrainte mécanique de l'introduction des filets résolu, une évolution de la matière au sein du composteur a pu être observée.

Pour les deux phases, une nette et rapide évolution de la matière au cours du compostage a été observée (Figure 12) : assèchement et homogénéisation de la matière. Néanmoins les filets sont encore visibles en sortie de composteur.

FIGURE 12 : ÉVOLUTION VISUELLE DE LA MATIERE

Ration

Compost trappe intermédiaire

Compost sortie



Echelle : 1 carré = 10 mm

5.2 Déroulement du compostage

Le processus de compostage s'est déroulé en 2 étapes successives : une étape en composteur électromécanique puis une étape de maturation (cf. Figure 7).

Les paramètres de suivi ont eu pour but de vérifier le bon déroulement du procédé de compostage avec l'ajout des filets et de qualifier l'éventuel impact de l'ajout des filets sur le déroulement biologique du compostage.

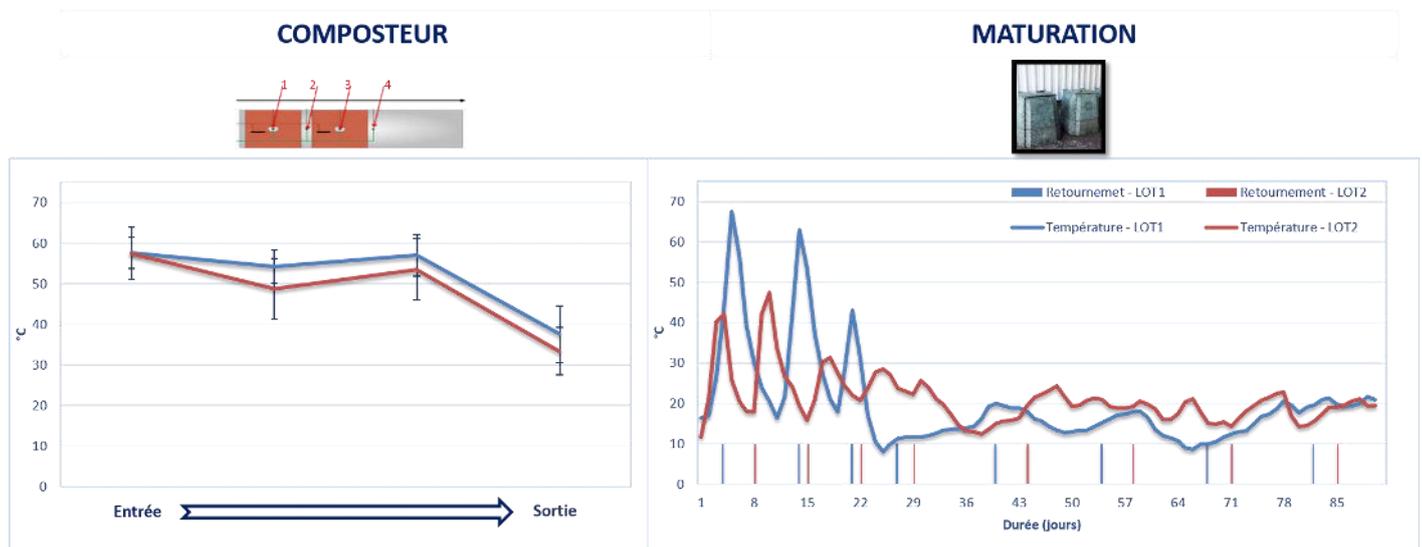
Les différents paramètres suivis sont présentés ci-dessous.

- ➔ Une mesure quotidienne de la **teneur en oxygène** dans le composteur (prélèvement au niveau de la ventilation) a été réalisée. Le taux d'oxygène a été en moyenne de $20,7\% \pm 0,4\%$ pendant toute la durée des essais, soit le taux d'oxygène de l'air, indiquant que le taux de ventilation (aspiration + ouverture) est très largement suffisant pour maintenir des conditions non limitantes en oxygène permettant le bon déroulement du compostage.
- ➔ Un suivi de la **température** a également été réalisé, au sein du composteur qui est muni d'un système de chauffage (cf. § 2.1) identique pour les deux modalités. Le suivi de température dans le composteur électromécanique n'a pas pu être un indicateur de pilotage (du fait du chauffage), néanmoins ce suivi a permis de mettre en avant le bon fonctionnement du composteur électromécanique au cours des essais (Figure 13).

La température joue un rôle aussi pour la diminution des pathogènes au sein des composts. Lors de l'analyse des critères microbiologiques, il pourra être vérifié si la température lors des essais a été suffisante ou non.

Lors de la maturation, l'enregistrement de la température du compost au cœur des bacs de maturation a permis un suivi continu de ce paramètre (Figure 13).

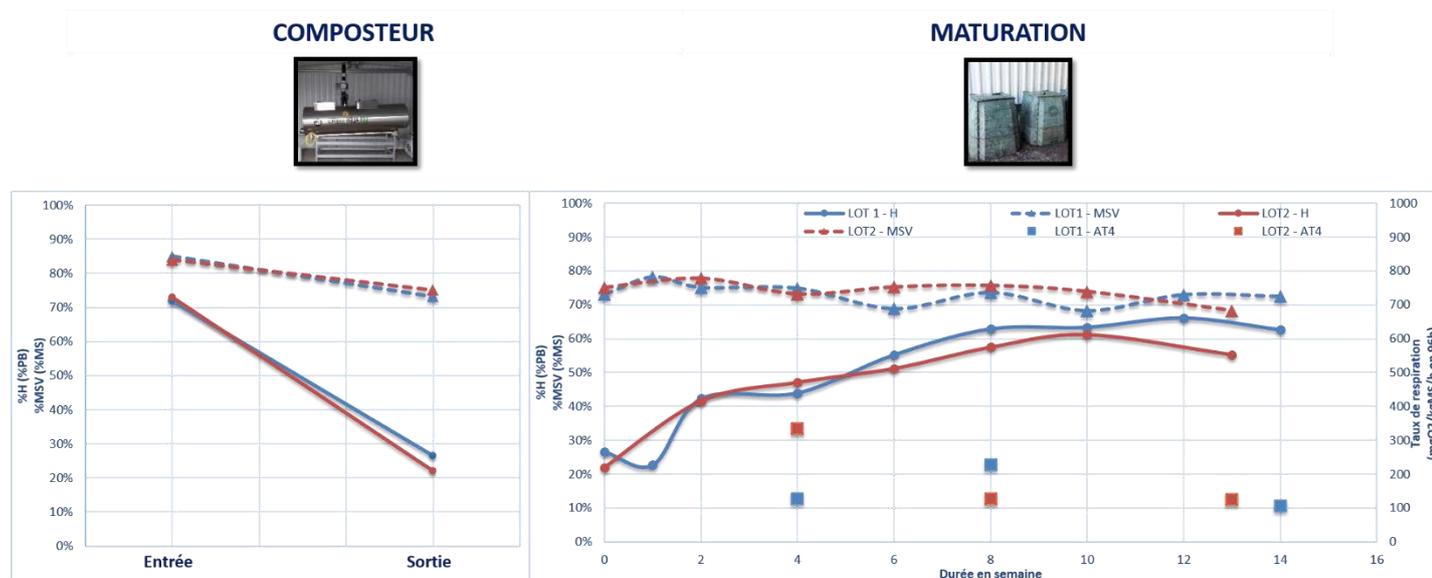
FIGURE 13 : SUIVI DE LA TEMPÉRATURE AU COURS DU COMPOSTAGE ET DE LA MATURATION



On constate des profils de température assez similaire d'un lot à l'autre. On observe une reprise en température à la mise en maturation et lors des premiers retournements, jusqu'à 70°C pour le lot 1 et 53°C pour le lot 2, signe d'une activité aérobie relative au démarrage. Cette température décroît ensuite, pour atteindre au bout d'un mois des valeurs stabilisées proches des températures ambiantes, signe d'une activité aérobie ralentie lié au fait que la totalité de la matière organique dégradables a déjà été compostée.

- ➔ Un suivi de l'évolution de la **matière organique**, ainsi que de l'**humidité** au cours du compostage et de la maturation a été réalisé (Figure 14).

FIGURE 14 : EVOLUTION DE LA MATIERE AU COURS DU COMPOSTAGE ET DE LA MATURATION



→ Au cours du compostage, un assèchement important de la matière est observé de 40 à 50 points pour les phases 1 et 2 respectivement. Lors de la mise en maturation, les deux lots de composts ont été arrosés régulièrement pour relever un taux d'humidité trop bas au démarrage. Ainsi l'humidité au sein des composts a augmenté jusqu'à atteindre des valeurs d'humidité optimales pour la maturation, entre 40 et 60% d'humidité.

→ Concernant la teneur en **matière organique** (MSV), on constate un abattement de la matière organique, d'environ 12% pour les deux lots à la sortie du composteur. La phase de compostage électromécanique concerne la phase active du compostage où la quasi-totalité, voire la totalité, de la dégradation de la matière organique est réalisée. Pendant cette phase, on assiste à une maturation du compost et à une humification de la matière organique restante. Le suivi de la MSV des lots de composts mis à maturation montre que la teneur en matière organique n'évolue pas au cours de la maturation, confirmant l'efficacité de l'étape de compostage électromécanique.

→ Un test de respiration a été réalisé au cours du procédé de compostage afin d'évaluer l'activité de la flore bactérienne responsable du compostage. Moins la respiration est élevée, plus l'activité est faible, plus le compost est mûr. On constate que la cinétique suit l'évolution de la température du compost. On constate un faible taux de respiration dès 1 mois de maturation pour le lot 1 puis une stabilisation, alors que pour le lot 2 le taux de respiration baisse jusqu'à 2 mois de maturation puis se stabilise. En fin de maturation, les 2 lots de composts sont mûrs au vue des faibles taux de respiration, confirmant également l'efficacité de l'étape de compostage électromécanique.

Pour conclure :

- Lors du lancement des essais avec la première découpe des filets, une difficulté d'avancement de la matière a pu être observé. Une deuxième découpe, réduisant la taille des filets, a été nécessaire afin de rendre l'incorporation possible des filets au sein du composteur électromécanique. Un broyage des filets sera donc à privilégier afin d'éliminer la contrainte de l'enroulement autour de l'axe du composteur pour des essais à grande échelle.
- Il a pu être observé que l'incorporation d'un taux plus important de filets (23% au lieu de 15%) n'influit pas sur le procédé biologique et n'engendrait pas de contrainte mécanique.

- Le suivi des différents paramètres de compostage a permis de mettre en avant le bon déroulement du compostage :
 - Le suivi de l’oxygène et de la température a montré un déroulement correct du compostage
 - Le suivi visuel et le suivi de la matière organique a permis de montrer un compost en sortie de composteur qui est homogène et bonne dégradation de la matière organique.
- La majeure partie de la dégradation de la matière organique (phase active de compostage) a bien eu lieu au niveau du composteur électromécanique.
- On a mesuré une activité aérobie limitée principalement au premier mois. Après cette date, l’évolution en terme de taux de matière organique et de maturité est faible. La durée de cette phase de maturation doit donc pouvoir être réduite à 2 mois, ou légèrement plus pour garder une marge de sécurité.

6 DESINTEGRATION DES FILETS

On a pu montrer précédemment, un bon déroulement du compostage ainsi qu’une bonne dégradation de la matière organique et des conditions de compostage représentatives d’un fonctionnement électromécanique classique. Cependant, le bon déroulement des essais a-t-il permis la bonne désintégration des filets ? Pour mesurer la dégradation des filets, un criblage à 2 mm des composts a été réalisé après le compostage électromécanique et après maturation afin de rechercher les résidus de filets résiduels. Les résultats sont présentés dans la Figure 15 et la Figure 16.

FIGURE 15 : BILAN DE DESINTEGRATION DES FILETS

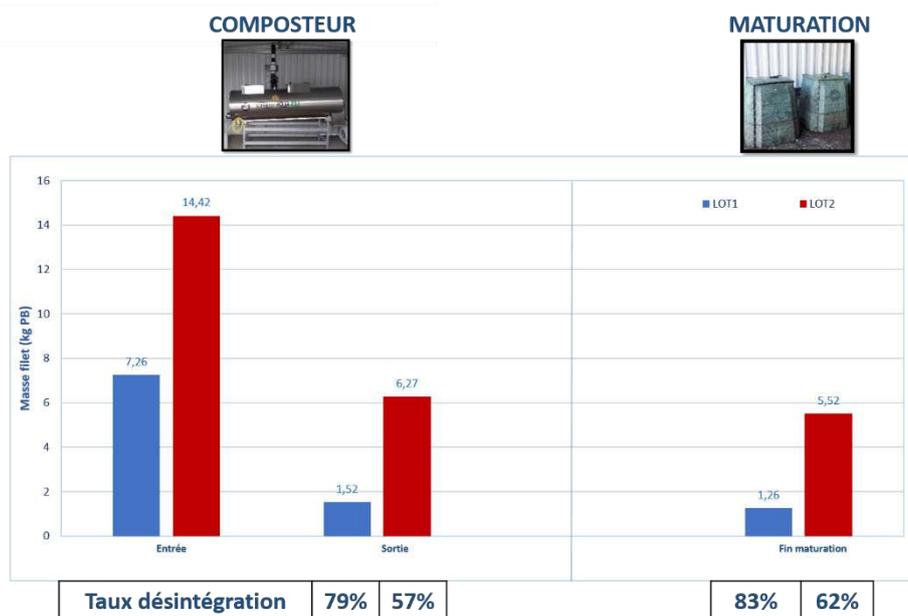


FIGURE 16 : VISUELS DES FILETS RESTANTS APRES MATURATION [(A : LOT1 ; B :LOT2)]



On observe en fin de maturation, une persistance des filets au sein des composts. Cependant, les filets ont réduit de tailles et leurs épaisseurs ont diminué.

On observe également un taux de désintégration de 79% pour le lot 1 en sortie de composteur, et de 57% pour le lot 2. En fin de maturation ses taux sont plus élevé pour le lot 1 le taux s'élève à 83% alors que pour le lot 2 le taux de désintégration n'est que de 62%.

La différence s'explique peut être par le taux de filets qui est différent entre le lot 1 et 2 (15% et 23% respectivement).

7 QUALITE DU COMPOST

Les deux lots de composts produits en phases stabilisées ont été caractérisés en fin de maturation par les analyses suivantes :

- Analyse de la composition biochimique
- Analyse de l'innocuité
 - Métaux
 - Pathogènes
 - Essais de phytotoxicité

7.1 Composition biochimique

Pour envisager la valorisation des filets, les critères habituels des normes sont regardés pour les composts produits lors de ces essais. Les critères de la norme NF U44-051 sont considérés.

			Compost LOT 1	Compost LOT 2	Seuils NF U44-051
Humidité	NF EN 13040	% PB	61,0%	51,3%	
Matière sèche	NF EN 13040	% PB	39,0%	42,7%	>=30
Matière sèche volatile	NF EN 13039	% MS	71,4%	64,7%	
		% PB	27,8%	27,6%	>=25
Matières minérales	NF EN 13039	% MS	28,7%	35,3%	
		% PB	11,2%	15,8%	
Carbone organique	Calcul	% MS	35,7%	32,3%	
		% PB	13,9%	13,8%	
pH	M.I. selon NF EN 13037		9,2	8,4	
Conductivité	M.I	mS/m	124,0	146,0	
Chlorures aqueux	NF EN 9297/ Ext. Aqueux 1/5 (v/v)	g/kg MS	7,5	8,4	
Azote Kjeldahl	NF EN 13654-2	N % MS	3,44%	3,39%	
		N % PB	1,34%	1,45%	
Azote ammoniacal	NF ISO 14256-2	N % MS	0,003%	0,006%	
		N % PB	0,001%	0,003%	
Azote organique	Calcul	N % MS	3,43%	3,30%	
		N % PB	1,34%	1,41%	
C/N	Calcul		10,4	9,5	
Phosphore	NF EN ISO 11885	P ₂ O ₅ % MS	1,18%	1,03%	
		P ₂ O ₅ % PB	0,46%	0,44%	<3
Potassium	NF EN ISO 11885	K ₂ O % MS	1,65%	1,88%	
		K ₂ O % PB	0,64%	0,80%	<3
Calcium	NF EN ISO 11885	CaO % MS	6,86%	8,33%	
		CaO % PB	2,67%	3,56%	
Magnésium	NF EN ISO 11885	MgO % MS	0,57%	0,61%	
		MgO % PB	0,22%	0,26%	
Soufre	NF EN ISO 11885	SO ₃ % MS	1,03%	0,97%	
		SO ₃ % PB	0,40%	0,41%	
Sodium	NF EN ISO 11885	Na ₂ O % MS	0,90%	0,74%	
		Na ₂ O % PB	0,35%	0,32%	

Les résultats sont similaires pour les deux lots de compost.

Les teneurs en MS, MSV sont conformes au seuil de la norme. Il en est de même pour le phosphore et le potassium. Le rapport C/N pour les deux lots de composts sont faibles, 10,4 pour le lot 1 et 9,5 pour le lot 2, cela signifie une bonne dégradation de la matière organique et donc de la maturation.

Les filets proviennent du milieu marin, il a donc été nécessaire de vérifier si l'apport éventuelle de sel peut engendrer un impact sur la qualité du compost. Le sel est constitué de cristaux de chlorure de sodium (NaCl), c'est pour cela, qu'une attention particulière a été apporté sur la concentration des ions chlorures, sodium, ainsi que sur la conductivité électrique.

En effet, les principaux sels responsables de la salinité sont les sels de calcium, de magnésium, de sodium; les chlorures, les sulfates et les bicarbonates. Une valeur élevée de la salinité signifie une grande quantité d'ions en solution, ce qui rend plus difficile l'absorption de l'eau et des éléments minéraux par la plante. Une salinité trop élevée peut causer des brûlures racinaires. En effet, des effets néfastes peuvent se manifester sur les plantes cultivées. Ces effets se traduisent par des changement morphologiques, physiologiques, biochimiques et moléculaire qui affectent négativement la croissance et la productivité végétale

Des seuils de salinité pour les composts pour l'épandage n'a pas pu être trouver, néanmoins des seuils pour l'eau d'irrigation a pu être trouvés. L'eau pour l'irrigation doit avoir un degré faible ou moyen de salinité, ayant une conductivité électrique de 60 à 170 mS/m.

Nos lots de composts présentent une conductivité de 124,0 pour le lot 1 et de 146,0 pour le lot 2, ils présentent donc une salinité légère.

Une attention particulière devra être portée quant à l'épandage de ces composts dans le temps, afin de limiter la teneur en sel dans les sols, qui pourra affecter négativement le rendement des récoltes, provoquera une dégradation de sols et une pollution des eaux souterraines.

7.2 Innocuité

De la même façon que pour la composition biochimique (§7.1), les critères étudiés concernant l'innocuité sont ceux préconisés par la norme NF U44-051, auxquels un test de phytotoxicité a été rajouté.

7.2.1 Métaux

Concernant les ETM (Tableau 9), l'ensemble des seuils fixés par la norme sont respectés.

TABLEAU 9 : TENEURS EN ETM DES COMPOSTS

			Compost LOT 1	Compost LOT 2	Seuils NF U44-051
Cobalt	NF EN ISO 11885	mg/kg MS	2,08	2,5	
Fer	NF EN ISO 11885	mg/kg MS	4 938,0	4 485,0	
Manganèse	NF EN ISO 11885	mg/kg MS	202,0	211,3	
Molybdène	NF EN ISO 11885	mg/kg MS	1,77	1,09	
Arsenic	NF EN ISO 11885	mg/kg MS	1,58	2,75	18
Sélénium	NF EN ISO 11885	mg/kg MS	< 3,20	< 3,21	12
Cadmium	NF EN ISO 11885	mg/kg MS	0,26	0,29	3
Chrome	NF EN ISO 11885	mg/kg MS	11,4	11,6	120
Cuivre	NF EN ISO 11885	mg/kg MS	27,4	27,9	300
Mercure	M.I	mg/kg MS	0,027	0,029	2
Nickel	NF EN ISO 11885	mg/kg MS	6,06	7,20	60
Plomb	NF EN ISO 11885	mg/kg MS	15,7	10,3	180
Zinc	NF EN ISO 11885	mg/kg MS	123,2	111,0	800

7.2.2 Analyses microbiologiques du compost

Les critères microbiologiques imposés dans le norme compost NF U 44-051 ont été recherchés dans les deux lots de composts (Tableau 10).

TABLEAU 10 : ANALYSES DES PARAMETRES MICROBIOLOGIQUES DES COMPOSTS

	Compost LOT 1	Compost LOT 2	Seuils NF U44-051
Dénombrement Escherichia coli	< 1 000	< 10 000	100
Dénombrement Entérocoques	36 167	1 553 808	1 000
Recherche Salmonelle spp sur 25 g	Absence	Absence	Absence
Recherche œufs d'helminthes viables (1,5 g)	Absence	Absence	Absence

Pour les paramètres œufs d'helminthes viables et Salmonelle, aucune détection n'est observée pour les deux lots de composts.

Concernant E.coli et les entérocoques, on observe des taux très supérieurs au seuil de la norme.

Les critères microbiologiques ne sont pas respectés dans les composts pour les deux lots. On peut suggérer que, des conditions de température plus élevées pourraient permettre un abattement plus important des pathogènes. Le temps de séjour, à ces températures élevées, dans le composteur électromécanique peut être un point clé dans l'hygiénisation du compost.

7.2.3 Phytotoxicité

Afin d'étudier l'innocuité des composts produits, un test de phytotoxicité a été réalisé. Ce test permet de vérifier le risque d'une potentielle inhibition lié à l'utilisation du compost issu de la biodégradation des filets, dans les conditions testées (effet de la dégradation du polymère, effet de la qualité du compost,...).

Le protocole utilisé est adapté, à la fois des normes NF EN 13432 et OCDE 208¹ et FD U44-167².

Les effets écotoxiques sur deux plantes supérieures (blé et cresson) ont été déterminés sur des mélanges avec un sol de référence et compost issu des essais. Pour cela trois ratios ont été testés :

- 5% v/v (ratio 1) : équivalent à une dose d'épandage classique pour un amendement organique.
- 25% v/v (ratio 2) : correspondant à la dose base d'étude de la phytotoxicité pour les matériaux biodégradables,
- 50% v/v (ratio 3) : correspondant à la dose haute d'étude de la phytotoxicité pour les matériaux biodégradables.

Les Figure 17 et Figure 18, présentent les résultats du test de phytotoxicité (réalisées en triplicas).

FIGURE 17 : ASPECT VISUEL DES PLANTES LORS DE LA RECOLTE



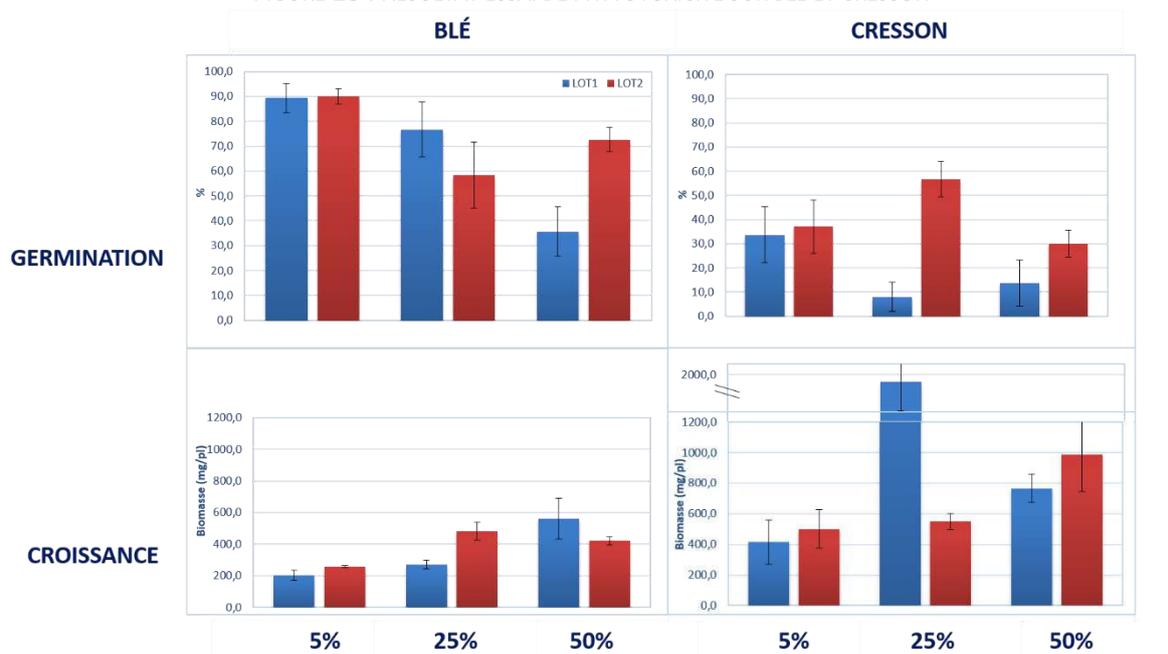
Les performances sont évaluées selon 2 critères :

- Le taux de germination,
- La masse de biomasse végétale (croissance).

¹ NE EN 13432 novembre 2000 : exigences relatives aux emballages valorisables par compostage et biodégradation – OCDE 208 septembre 2003 : tests d'émergence et croissance des semis.

² Amendements organiques - Essai d'évaluation de l'émergence et de la croissance de plantes supérieures dans les conditions d'utilisation des amendements organiques

FIGURE 18 : RESULTAT ESSAI DE PHYTOXICITE SUR BLE ET CRESSON



Concernant la germination, on observe un impact négatif de l’ajout de compost, pour les deux lots. L’impact étant plus marqué pour le cresson. En effet, le cresson est connu pour être très sensible au niveau de la germination à la présence de polluants dans le sol, d’acides, d’azote....

Par ailleurs, on constate que pour le lot 1, la germination est plus impactée, cela pourrait être expliqué par le fait que les filets se sont plus dégradés et ainsi plus d’apport de fragments de filets qui pourraient être néfaste à la germination.

Il n’est pas possible à ce stade de valider ou d’invalider l’une ou l’autre des hypothèses et de statuer précisément sur la cause d’une baisse de la germination.

En terme de biomasse aérienne, on constate une biomasse plus importante avec l’apport de compost. Il semble qu’on puisse conclure sur l’impact positif de l’apport nutritif du compost pour la croissance des plantes.

Pour conclure :

Le Tableau 11 synthétise les résultats de caractérisation des composts obtenus lors des essais de compostage en composteur électromécanique.

TABLEAU 11 : BILAN DES ANALYSES DE CARACTERISATION DES COMPOSTS

	Compost LOT 1	Compost LOT 2
Composition biochimique		
Métaux		
Paramètres microbiologiques		
Essais de phytotoxicité		

- ➔ La composition biochimique des composts obtenus correspond aux standards habituels.
- ➔ Les deux lots de compost respectent les seuils habituels fixés par les normes relatives aux composts pour les métaux.
- ➔ Les essais de phytotoxicité menés ont permis de montrer un risque de phytotoxicité sur la germination des plantes pour les composts produits. Un effet plus marqué a été observé pour le compost du lot 1.
- ➔ Les points bloquant aujourd’hui pour le retour au sol des composts, tels qu’ils ont été produits lors de ces essais, sont d’une part le non-respects des critères microbiologiques et d’autre part la teneur en sel.

En effet, les analyses ont montré que les seuils concernant les paramètres microbiologiques ne sont pas atteints. Si on peut penser qu’en travaillant sur les conditions de température (échelle plus importante ou réglage différents) et de temps de séjour global (phase de compostage électromécanique + maturation) différents, un abattement supérieur pourra éventuellement être obtenu, permettant ainsi d’atteindre une qualité microbiologique compatible avec un retour au sol, ce point restera à vérifier pour statuer sur la possibilité d’une valorisation agricole de tels composts.

8 CONCLUSIONS

L'APESA a accompagné la société UPYCLE pour l'étude de la faisabilité d'une filière de compostage in situ à l'aide d'un composteur électromécanique, des filets de catinage avec des co-produits tels que biodéchets et déchets verts. L'APESA est intervenue pour l'accompagnement scientifique et le suivi analytique.

Le suivi de ces essais de compostage a eu pour objectifs de :

- Valider la faisabilité du compostage des filets de catinage en composteur électromécanique,
- Valider la proportion d'intégration des filets dans le mélange,
- Caractériser le bon déroulement du compostage de ces mélanges,
- Caractériser la qualité agronomiques et microbiologiques des composts obtenus.

Deux types de mélanges ont été testés : un mélange avec une proportion de 15% de filets (volume) et un mélange avec 23% de filets (volume).

Le suivi de ces essais a permis de montrer :

- **Le compostage des filets de catinage est possible**, cependant avant leur introduction dans le composteur électromécanique, ces filets doivent être broyés à l'aide de broyeur adapté.
- Le suivi des paramètres de compostage tels que l'évolution du taux de matière organique, et l'aspect des matières et notamment des filets (diminution de la taille et de l'épaisseur), a montré que le compostage est effectif. **L'ajout de filet en compostage avec des co-produits n'a pas montré d'effet négatif, même en augmentant la quantité de filets.**
- **Les composts obtenus au bout de 2 mois de compostage sont matures.** En effet, l'évolution en terme de taux de matière organique et de maturité est faible. La durée de cette phase de maturation doit donc pouvoir être réduite à 2 mois, ou légèrement plus pour garder une marge de sécurité.
- Les composts obtenus correspondent aux standards habituels et respectent les seuils habituels fixés par les normes relatives aux composts au niveau des compositions chimiques et métaux.
- Du point de vue microbiologique, la température du composteur et les montées de température pendant la maturation sont insuffisantes et **ne permettent pas l'abattement des pathogènes pour répondre aux exigences réglementaires.**
- Concernant la phytotoxicité, **un impact sur la germination** des plantes a pu être observé pour les composts produits.

Pour approfondir et compléter cette étude, il serait pertinent de :

- Tester le compostage au sein du composteur électromécanique avec des filets broyés au préalable avec des broyeurs adaptés.
- Tester le compostage avec une température plus élevée pour vérifier l'impact sur l'abattement des pathogènes.
- Etudier la composition des filets de catinage pour vérifier leur éventuel impact sur le compost.

*Utilisation de la larve d'oursin (*Paracentrotus lividus*)
pour évaluer la toxicité de matériels conchylicoles
biosourcés.*



Réalisé en Juin-Juillet 2022 par Solveig Larssonneur

Commanditaire : SMIDAP



Synergie Mer et Littoral
33, rue du Banc du Nord
50560 BLAINVILLE-SUR-MER
www.smel.fr



Syndicat Mixte pour le Développement de
l'Aquaculture et de la Pêche en Pays de la Loire
3, rue Célestin Freinet
44200 NANTES
www.smidap.fr

Pour citer ce rapport :

Larsonneur S., 2022. Utilisation de la larve d'oursin (*Paracentrotus lividus*) pour évaluer la toxicité de matériels conchylicoles biosourcés. Convention SMIDAP / SMEL, 35 p.

Table des matières

Utilisation de la larve d'oursin (<i>Paracentrotus lividus</i>) pour évaluer la toxicité de matériaux conchylicoles biosourcés.....	1
Glossaire	4
I. Introduction.....	5
II. Matériel et méthode	8
2.1 – Matériel à tester	8
2.2 – Matériel biologique	9
2.3 – Protocole d'expérimentation	11
2.4 – Méthode d'observation.....	11
2.5 – Méthode d'analyse statistique	12
III. Résultats	12
3.1 – Témoin positif : Gamme de cuivre et témoin négatif (T)	12
3.2 – Comparaison entre les échantillons :	15
3.3 – Gradient de toxicité du test :.....	18
IV. Discussion	19
V. Conclusion	23
Annexes	24
Bibliographie.....	35

Glossaire

AFNOR : Association Française de Normalisation.

Biodégradation : Décomposition de certaines substances par des organismes vivants.

BIOFILET : Filets Biosourcés et compostables (projet).

Biopolymère : Polymère issu de la biomasse.

CEN : Comité Européen de Normalisation.

Catinage : Action de poser un filet tubulaire en plastique sur les pieux à moules, à différentes durées d'élevage, afin de maintenir les moules en croissance sur le pieu.

Conchyliculture : Ensemble de procédés et de techniques utilisés pour l'élevage et la production de coquillages.

CREC : Centre de Recherche en Environnement Côtier.

DDD : Dichlorodiphényldichloroéthane.

Ecotoxicologie : Science qui traite de l'impact possible des produits chimiques et toxiques sur l'environnement et les organismes.

Espèces bioindicatrices : Organismes animaux ou végétaux qui contiennent une partie de l'information environnementale qui les entoure et qui reflètent l'état des écosystèmes.

Filière de Responsabilité Elargie du Producteur : Dispositifs particuliers d'organisation de la prévention et de la gestion des déchets qui concernent certains types de produits.

ISO : Organisation Internationale de Normalisation.

Lixiviat : Liquide qui a percolé à travers un solide et lessivé certains des constituants nocifs, souvent polluants.

Mytiliculture : Ensemble de procédé et de techniques utilisés pour l'élevage et la production de moules.

PBAT : Polybutylène Adipate Téréphtalate.

PE : Polyéthylène.

Pétrochimie : Ensemble des technologies utilisant le pétrole pour fabriquer des composés chimiques synthétiques.

PLA : Acide Polylactique.

Polymère : Substance composée d'un grand nombre de structures moléculaires de faible masse, créant des molécules possédant une masse molaire élevée.

PP : Polypropylène.

REIPLIC : Réduction des Impacts des Plastiques en Conchyliculture (projet).

SMEL : Synergie Mer Et Littoral.

SMIDAP : Syndicat Mixte pour le Développement de l'Aquaculture et de la Pêche en Pays de la Loire.

I. Introduction

Objectif : Effets des lixiviats issus de la dégradation de filets de catinage biosourcés en comparaison avec ceux issus de filets de catinage conventionnels sur le développement de larves d'oursins *Paracentrotus lividus*.

Le secteur de la conchyliculture utilise depuis de nombreuses années du matériel issu de la pétrochimie. Tous n'ont pas la même durée de vie, certains pouvant être utilisés pendant des années, à l'exemple de la poche à huître qui, si elle reste en bon état, peut être utilisée pendant dix ans. Dans le cas de la mytiliculture, le matériel utilisé tend à être considéré comme du consommable, les filets de catinage ne pouvant être utilisés que sur un cycle unique de production. Ce ne fut pas toujours le cas, car jusqu'au début des années 1970, le matériel de conchyliculture était d'origine naturelle, et le catinage se faisait par exemple en branche de châtaignier.

D'une manière générale, toute la filière conchylicole est dépendante du plastique pour satisfaire la production. Cependant, lors de tempêtes ou lors de la manipulation, des filets de catinage, des poches à huîtres, des manchons de protection, et bien d'autre sorte de matériels peuvent être perdus en mer, et peuvent s'échouer sur les plages. Cette pollution tend à ternir l'image de la profession vis-à-vis du grand public.

Une seconde problématique non négligeable a vu le jour ces dernières années, celle de la présence de microplastiques dans les produits de la mer. Malgré des définitions qui peuvent différer, un microplastique est généralement défini comme étant un fragment dont la taille est inférieure à 5mm (Barnes, Galgani, Thompson, & Barlaz, 2009), et peut provenir de deux origines (Cole, Lindeque, Halsband, & Galloway, 2011) :

- Les microplastiques primaires, directement produits sous forme de microparticules pour être ensuite ajoutés dans des produits cosmétiques ou utilisés ultérieurement comme matières premières à la production de granulés plastiques.
- Les microplastiques secondaires, issus de la dégradation physique et chimique de déchets plastiques.

Il s'avère effectivement que moins d'un animal sur deux (huîtres, moules, palourdes et coques confondues) contient des microplastiques, à raison de 0,57 particule/individus pour les moules et 1,71 particule/individus pour les huîtres (Blin, et al., 2020). Toutefois, ces résultats sont à interpréter avec nuance et précaution, étant donné qu'il existe très peu de données évaluant cette contamination dans les produits conchyliques en France et notamment en Pays de la Loire.

Enfin, la production de ces matériaux en elle-même est amenée à évoluer, pour une raison simple : ces plastiques sont issus de ressources pétrochimiques disponibles dans un stock limité, ne cessant de diminuer, et impactant par la même occasion les cours du pétrole et donc la production d'objets plastiques. Les analystes spécialisés dans l'estimation de l'état des réserves mondiales tel que l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), considère qu'un « pic pétrolier » pourrait être atteint entre 2025 et 2035, seuil au-delà duquel, si de nouveaux gisements de pétrole conventionnel ou non-conventionnel ne sont pas découverts, les moyens techniques et technologiques actuels ne seront plus en mesure de continuer à exploiter les gisements disponibles.¹

Afin de préserver l'environnement et d'anticiper le déclin annoncé, professionnels de la conchyliculture et de la pêche, motivées aussi par l'entrée en vigueur de nouveaux textes réglementaires, telle la loi n° 2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à

¹ <https://finance-heros.fr/pic-petrolier/>

l'économie circulaire, qui impose que les engins de pêche soit considérés dans les filières de responsabilité élargie du producteur (REP) d'ici 2025, se tournent vers le secteur de l'innovation qui propose un matériau intéressant à tout point de vue : les biopolymères, ou bioplastiques.

Qu'est-ce qu'un biopolymère ? Ce terme prête souvent à confusion et il est nécessaire d'en faire une définition claire : il met en avant l'origine biosourcée du matériau, c'est-à-dire une ressource renouvelable, mais aussi la gestion de sa fin de vie, c'est-à-dire biodégradable (Deroine, 2014). Il regroupe trois familles de polymères :

- Biosourcés ET biodégradables
- Biosourcés et NON-biodégradables
- Non-biosourcé ET biodégradables

Un bioplastique biosourcé est donc issu de ressources biologiques, le plus souvent végétales, tels que l'amidon et les sucres extraits de la pomme de terre, de la canne à sucre, de la betterave, du maïs etc. Certaines huiles végétales peuvent être utilisées, comme le tournesol, le lin ou le soja. Des protéines et des lipides provenant du monde animal comme la caséine, le lactosérum, les matières grasses ou encore la gélatine peuvent également être utilisées (Fig.1). Toutefois, l'origine biosourcée du matériau peut à terme poser certains problèmes, tels que la compétition avec les cultures pour l'alimentation. Il existe deux processus principaux de fabrication, soit un processus chimique (hydrolyse, déshydratation etc.), soit un processus biotechnologique (fermentation par exemple). Le polyhydroxyalcanoates (PHA), pour illustrer, est produit à partir de ressources végétales et synthétisé par des bactéries. (Gontard, Bruzard, & Ghiglione, 2019).

La notion de biodégradabilité doit aussi être manipulée avec précaution. En effet, que le polymère soit biosourcé ou non, il peut être biodégradable. Ce principe dépend de la structure chimique du polymère et du milieu dans lequel sa fin de vie est envisagée (Deroine, 2014). A titre d'exemple, le matériau SEA 212 utilisé pour la fabrication des filets extrudés testés dans cette expérimentation est prévu pour être biodégradable dans un compost industriel à haute température, les andains pouvant atteindre à cœur des températures supérieures à 70°C, lorsqu'à contrario le prototype développé dans le projet INDIGO (*INnovative fishing Gear for Ocean*)² est prévu pour être en mesure de se biodégrader en milieu marin, dans le cas où le filet serait perdu en mer.

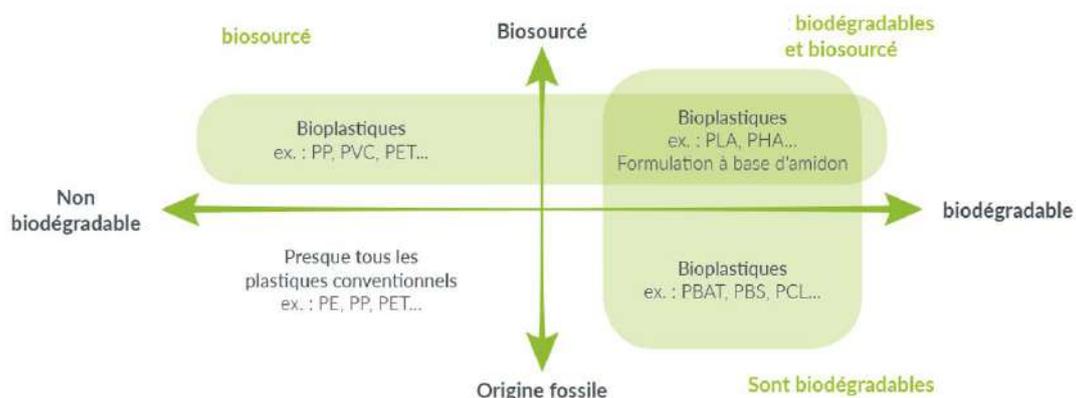


Figure 1 - Matrice des bioplastiques. Deroine, 2021. Repris de Lapointe, 2012.

Les défis techniques et technologiques sont toutefois de taille afin d'adapter un biopolymère aux usages de l'aquaculture ou de la pêche. En effet, le matériel de conchyliculture et les engins de pêche sont prévus pour résister pendant des années à de rudes conditions d'utilisation et de stockage

² <https://indigo-interregproject.eu/presentation-du-projet/>

(alternance immersion/émersion, effets des UV, résistance à la force de l'eau et/ou au poids des captures etc.). En résumé, ce sont tous les éléments de prédilection pour affaiblir la chaîne moléculaire des bioplastiques et ainsi accélérer leur biodégradation. L'objectif de la conception est donc de créer un engin qui soit résistant à la fois mécaniquement et dans le temps, mais aussi capable de se biodégrader lorsqu'il sera en fin de vie et déposé dans l'endroit prévu pour son traitement.

C'est à ce stade que l'écotoxicité de ces matériaux se doit d'être évaluée. En effet, afin qu'un plastique soit considéré comme biodégradable, il doit se conformer à plusieurs règles, définies par des normes (par exemple AFNOR au niveau français ; CEN au niveau européen ; ISO au niveau international). La norme OCDE 208 par exemple, définit les conditions de qualité d'un compost final : cette qualité ne doit pas être modifiée par les matériaux ajoutés au compost, et celui-ci ne doit pas être dangereux pour l'environnement. Cette norme impose la réalisation de tests écotoxicologiques sur le compost final.

L'écotoxicologie apparaît dans les années 1950 à la suite d'accidents de pollution impactant la santé humaine et l'environnement, et notamment à la suite du « Clear Lake » en Californie. Un insecticide chloré, le DDD, est utilisé pour désinsectiser le lac des moucheron le colonisant et ainsi permettre aux baigneurs de retrouver leur tranquillité. En l'espace de trois ans, les colonies de grèbes (*Acchmophorus accidentalis*) ont été décimées. Les analyses réalisées en remontant la chaîne alimentaire ont permis de montrer que les concentrations en DDD sont bien supérieures dans les graisses de l'oiseau, au sommet de la chaîne trophique, que dans le phytoplancton, à la base de celle-ci (Hunt & Bischoff, 1960). C'est le phénomène de « bioamplification » ou « bioconcentration ».

Une des premières définitions de l'écotoxicologie est généralement attribuée à Truhaut (1977) comme étant « *une branche de la toxicologie qui étudie les effets toxiques provoqués par les substances naturelles ou les polluants d'origine synthétique sur les constituants des écosystèmes animaux, y compris l'Homme, végétaux et micro-organismes, dans un contexte intégré* ».

En résumé, c'est un domaine scientifique qui intègre les effets écologiques et toxicologiques des pollutions chimiques sur les populations, les communautés et les écosystèmes. Il existe une grande variété d'essais qui peuvent être classés (Forbes & Forbes, 1997) en fonction de :

- La conception : terrain, expérimental, modélisation.
- Le niveau d'organisation biologique : population, communauté, écosystème.
- La durée d'exposition : aiguë, subchronique, chronique.
- Le point final : létal, sublétal.

L'exposition écotoxicologique se base entre autres sur l'utilisation d'espèces bioindicatrices, c'est-à-dire des espèces représentatives de la biodiversité au sens large, qui sont réactives aux pollutions et qui agissent comme une alerte précoce sur le changement de certaines conditions environnementales. (Butler, Freckleton, Renwick, & Norris, 2012). Elles donnent donc des informations sur la santé de l'écosystème où elles vivent. De plus, elles doivent être sédentaires, présentes en abondance, d'une taille suffisante pour être manipulées, leur biologie doit être connue, et elles doivent présenter une réponse évidente à un stress toxique dans un délai relativement rapide (Ramade, 1992).

Les échinodermes ont démontré un intérêt certain en écotoxicologie depuis des années, car ils rassemblent tous les critères exposés ci-dessus. Nombreuses sont les études qui utilisent l'oursin à différents stades de développement (gamètes, embryons ou adultes), telles les études de Bougis en 1967, Kobayashi en 1971 ou plus récemment Rendell-Bhatti en 2020. De plus, les avancées majeures en échiniculture permettent aujourd'hui d'obtenir des individus conditionnés de manière optimale en contrôlant la physiologie des animaux de manière à optimiser la reproduction et le développement larvaire, permettant ainsi de standardiser l'approvisionnement. Il est donc possible d'obtenir des

générateurs adultes de taille commercialisable en circuit semi-fermé, en l'espace de deux à trois ans, contre cinq à sept en milieu naturel (Blin, Sea urchin (*Paracentrotus lividus*) rearing in a closed circuit system., 1996). Depuis le début des années 1980, et jusqu'au début des années 2000, le SMEL (Synergie Mer Et Littoral), en collaboration avec l'université libre de Bruxelles et le CREC (UNICAEN – Luc sur mer), a étudié grâce à diverses expérimentations tous les stades de l'élevage en conditions contrôlées : du conditionnement des générateurs jusqu'à l'affinage, en passant par l'écloserie, la nurserie et le grossissement³. A ce jour, les oursins violets *Paracentrotus lividus* élevés au SMEL sont utilisés à des fins de recherches en interne ou envoyés vers d'autres équipes scientifiques, et à des fins pédagogiques pour servir de support pour des Travaux Pratiques par exemple.

Ce mémoire fait l'objet d'une convention de prestation entre le SMIDAP et le SMEL, dans le cadre du projet REIPLIC, faisant suite aux projets BIOFILET (Maheut, 2020) et FILALTIQ, et vise à réduire l'impact des plastiques issus de la conchyliculture. Dans ce projet, des filets mytilicoles en plastiques biosourcés et compostables sont testés à grande échelle par des professionnels, et en parallèle, des essais mécaniques et des essais de compostage industriel sont réalisés. Afin de compléter les analyses techniques menées dans ce projet, le SMIDAP a sollicité le SMEL pour réaliser des essais écotoxicologiques sur les prototypes, afin de vérifier l'effet de ces derniers sur la qualité d'une eau de mer.

Une pré-étude réalisée en 2019 a permis de valider le protocole d'expérimentation, et de montrer des résultats intéressants sur les larves. Réalisé sur seize échantillons, dont un biosourcé, l'essai a permis de dresser un gradient de toxicité pour les plastiques testés (Hégron, 2019).

Les objectifs de la présente expérimentation étaient donc multiples. D'une part, il s'agissait de vérifier si les lixiviats issus de la dégradation de filets de catinage biosourcés auraient ou non un impact sur la survie et le développement des larves d'oursins. D'autre part, il s'agissait de poursuivre l'acquisition de données concernant l'impact de la biodégradation des plastiques biosourcés sur les organismes marins, afin d'améliorer la conception des produits et ainsi soutenir la démarche d'innovation éco-responsable vers laquelle la profession est en train de se tourner.

Ce test est une adaptation de la méthode standardisée du développement larvaire de l'oursin pour l'évaluation de la qualité d'une eau de mer (S. Pétinay et al., 2009).

II. Matériel et méthode

2.1 – Matériel à tester

2.1.1 Filets de catinage extrudés

Afin de comparer les performances écotoxiques des prototypes, cinq filets de catinage extrudés sont testés, deux filets conventionnels et trois filets biosourcés (Annexe I).

Le premier filet conventionnel, identifié « Conventionnel 17/50 » est un filet extrudé vert neuf en Polyéthylène fourni par le SMIDAP.

Le second filet conventionnel, identifié « C », est un filet extrudé vert composé en Polyéthylène de la marque LACQTENE (correspondance à 98,46%), testé en 2021 via une analyse infrarouge par le plateau technique CompositIC de Lorient (Annexe II).

Le premier filet de catinage extrudé biosourcé, identifié « I », est un échantillon fabriqué par la société Intermas et composé d'un mélange de PBAT et de PLA, de la marque Ecovio de BASF (correspondance à 94,8%), testé en infrarouge en 2019 par le plateau technique CompositIC (Annexe III). Lors du

³ <https://www.smel.fr/2017/03/15/le-mais-grain-un-bon-aliment-pour-lelevage-des-oursins/>

premier test en 2019, ce filet n'avait pas montré de différence significative ($p < 0,05$) avec le témoin au regard du taux de non-développement ainsi qu'au regard du taux de malformation des larves, et n'avait pas montré de longueurs moyennes de spicules significativement différentes du témoin (Hégron, 2019). Ce résultat étant un premier « témoin » de l'innocuité toxique de la formulation de ce prototype, et même si les essais techniques de ces filets n'avaient pas été concluants, il a été jugé intéressant de le tester à nouveau et ainsi pouvoir vérifier, sur une durée de balnéation plus importante, si l'impact neutre de ce biopolymère sur le développement des larves se confirme.

Le second et le troisième filet testés, fournis par le SMIDAP, proviennent de la même gamme, produite par la société Seabird. Ces deux filets sont composés d'un mélange à base de plusieurs résines biosourcées nommé Sea212, et est 100% biodégradable en compost industriel⁴ (Annexe IV). Ce sont les prototypes testés dans le cadre du projet REIPLIC, il est donc important de vérifier s'ils seront neutres ou non dans le milieu marin. Le premier filet, identifié « A212 » est un ancien filet stocké un dans un entrepôt, à l'abri de la lumière et de l'humidité, pendant plus d'un an, et le second filet, identifié « N212 » est un échantillon neuf produit juste avant la mise en œuvre du test. Pour ces deux échantillons, l'objectif était de tester l'impact de la durée de stockage des filets biosourcés.

Tableau 1 – Récapitulatif des échantillons testés

Echantillon	Identification – Provenance	Composition
CONV17/50	Conventionnel 17/50 – SMIDAP	Polyéthylène
C	Conventionnel – LACQTENE – SMEL	Polyéthylène (PE) 98,46%
I	Intermas – ECOVIO – SMEL	PBAT/PLA (94,8%)
A212	Ancien Sea212 – Seabird – SMIDAP	Soit PBS/PBSA
N212	Nouveau Sea212 – Seabird – SMIDAP	Soit PBS/PBAT

2.1.2 Filets de catinage tricotés

Des filets de catinage tricotés biosourcés sont aussi testés dans le cadre de REIPLIC. Ces filets en PLA, ayant été produits plus tardivement, ils ont fait l'objet d'une deuxième manipulation. Un nouvel essai de deux échantillons a donc été réalisé en juillet 2023. L'objectif était de comparer deux filets mytilicoles, un filet biosourcé tricoté en PLA, utilisé dans le cadre du projet REIPLIC, et une chaînette de la gamme GLYNKA, de maille 16'45 en Polyéthylène.

Echantillon	Identification – Provenance	Composition
PLA	FIL SENBIS – TRICOTAGE GLYNKA - SMIDAP	PLA (100%)
GLYNKA	GLYNKA - SMIDAP	Polyéthylène (PE) (100%)

⁴ <https://www.seabird.fr/sear.php>

2.2 – Matériel biologique

Les larves d'oursin violet *Paracentrotus lividus* utilisées sont issues de géniteurs élevés au SMEL (Synergie Mer et Littoral) à Blainville-sur-Mer (50, Manche) dont le conditionnement est réalisé selon la méthode de standardisation précédemment citée (S. Pétinay et al., 2009). Les géniteurs sont élevés en circuit semi-fermé dans des bassins dont l'eau est thermorégulée à 18°C. Ils sont alimentés avec *Laminaria digitata* jusqu'à atteindre une taille suffisante d'environ 40mm, soit environ deux ans. Par la suite, les géniteurs sont soumis à un cycle de maturation de quatre mois environ se déroulant comme suit :

- Une phase de jeûne à 18°C avec une photopériode de type jour court (8:16), ce qui permet de vider les gonades par amaigrissement et ainsi homogénéiser le lot de géniteurs.
- Une phase de réalimentation pendant un mois avec du maïs et des laminaires, afin d'augmenter la glycémie et de favoriser le stockage des réserves glucidiques. En parallèle la température de l'eau est progressivement diminuée jusqu'à 8°C, cette température étant considérée comme le zéro biologique de la maturation, c'est-à-dire qu'en deçà elle ne produit plus d'effet maturant sur le développement des gamètes.
- Cette température est maintenue pendant un mois, et les géniteurs sont alimentés avec *Laminaria digitata*. En parallèle la photopériode est progressivement remontée sur un type jour long (16:8).
- Enfin, la température de l'eau est progressivement remontée d'1°C toutes les 48 heures, jusqu'à atteindre 18°C. Ces conditions sont maintenues pendant un mois, durée pendant laquelle les géniteurs peuvent être sollicités pour pondre et fournir les larves nécessaires. Au-delà de ce délai, le risque de lyse des gamètes pour remobiliser les réserves à destination du maintien métabolique est estimé être non négligeable et peut entraîner une détérioration de l'homogénéité de la qualité reproductive des géniteurs, ceci étant préjudiciable à la standardisation de la qualité des larves utilisées pour le bio-test.
- Chaque jour, les fèces sont retirées et l'eau est renouvelée de 50%.

L'émission des gamètes est déclenchée par injection de Chlorure de Potassium (KCl) à raison de 0,5 mL dans la membrane périorale, l'injection pouvant être répétée au maximum trois fois. Les gamètes sont émises dans de l'eau de mer reconstituée, et la fécondation est contrôlée en s'effectuant par ajout de sperme dans l'eau contenant les ovocytes. Une observation au microscope des ovocytes fécondés (100µL sur une lame) permet de s'assurer de la réussite de la ponte. Pour cela, le taux de fécondation doit être supérieur à 95%. Pour l'expérimentation, environ 300 ovocytes fécondés sont disposés dans chaque échantillon de 5mL à tester.

2.3 – Protocole d'expérimentation

Chaque échantillon du matériel testé a été découpé et pesé afin d'avoir la même quantité de matière dans chaque bouteille. 5g ($\pm 0,2$) ont été utilisés. Les matériaux ont été immergés dans des bouteilles en verre avec 0,90L d'eau de mer provenant du réseau du SMEL. L'utilisation de matériel en verre est importante afin de limiter les risques de contaminations extérieures. Une sonde a été immergée dans une bouteille témoin afin de suivre les paramètres de température tout au long de la période d'exposition. Un système de brassage par aération a été mis en place, permettant d'oxygéner le milieu en continu. Ce système fonctionne avec un tube raccordé à une pipette Pasteur en verre (Fig.2). Afin de contrôler l'évaporation de l'eau, les bouteilles ont été placées dans un bain-marie maintenu à 14°C. Les paramètres de température et de salinité ont été contrôlés tous les deux jours, et la salinité a été ajustée avec ajout d'eau distillée si cette dernière dépasse 35 ppt. A l'issue de 45 jours de balnéation, les échantillons d'eau ont été prélevés et analysés selon le protocole décrit ci-dessous.



Figure 2 - Photographie de la mise en place de l'expérimentation

2.4 – Méthode d'observation

Les échantillons ont été laissés pendant 72 heures dans une pièce à 18°C pour que les larves se développent jusqu'au stade pluteus. Elles n'ont pas été alimentées pour limiter les biais liés à l'apport d'éléments extérieurs.

A l'issue de cette période d'incubation, les larves ont été fixées au formaldéhyde (200 μ L pour 5mL, soit une concentration finale de 0,75%) afin de stopper leur développement.

Sur cent larves observées par échantillon, ont été évalués (Annexe V) :

- Le taux de larves non-développées (œuf fécondé, blastula, gastrula).
- Le taux de malformation (au stade échinopluteus).

Sur quinze larves observées par échantillon, sont mesurées :

- Les longueurs de spicules (\pm IC95).

Les séries d'échantillons ont été validées par un contrôle négatif, ici une eau de mer (EDM) prélevée au large, sur l'archipel des îles Chausey, effectuée en quintupla, et un contrôle positif au cuivre

(10µgCu/L ; 50µgCu/L ; 70µgCu/L ; 90µgCu/L). Toute expérimentation se doit d'être encadrée par un témoin négatif, appelé « blanc », et un témoin positif, ici le cuivre. L'utilisation d'un polluant dont l'effet sur les organismes est connu et reproductible permet d'assurer la validité de l'expérimentation.

Les mesures ont été réalisées au microscope inversé (x100), associé à un logiciel permettant l'acquisition d'images automatiques (Zen).

2.5 – Méthode d'analyse statistique

Les moyennes des taux de non développement (%), de malformation (%) et de longueurs des spicules (µm) ont d'abord été calculées, ainsi que les écart-types et les intervalles de confiance (IC±95). Ces moyennes, selon les concentrations, ont permis ensuite de déterminer la concentration létale médiane (CL50) à 24h et à 72h, soit la concentration d'une substance qui cause 50% de mortalité dans la population testée à 24h et à 72h d'exposition. Afin de déterminer s'il existait des différences significatives entre les échantillons testés, les taux de non développement, de malformation et les longueurs des spicules ont été analysés via une ANOVA et un test a posteriori (test de Student-Newman-Keuls, $\alpha=0,05$), en utilisant le logiciel StatView.

III. Résultats

3.1 Ecotoxicité - filets de catinage extrudés

3.1.1 Témoin positif : Gamme de cuivre et témoin négatif (T)

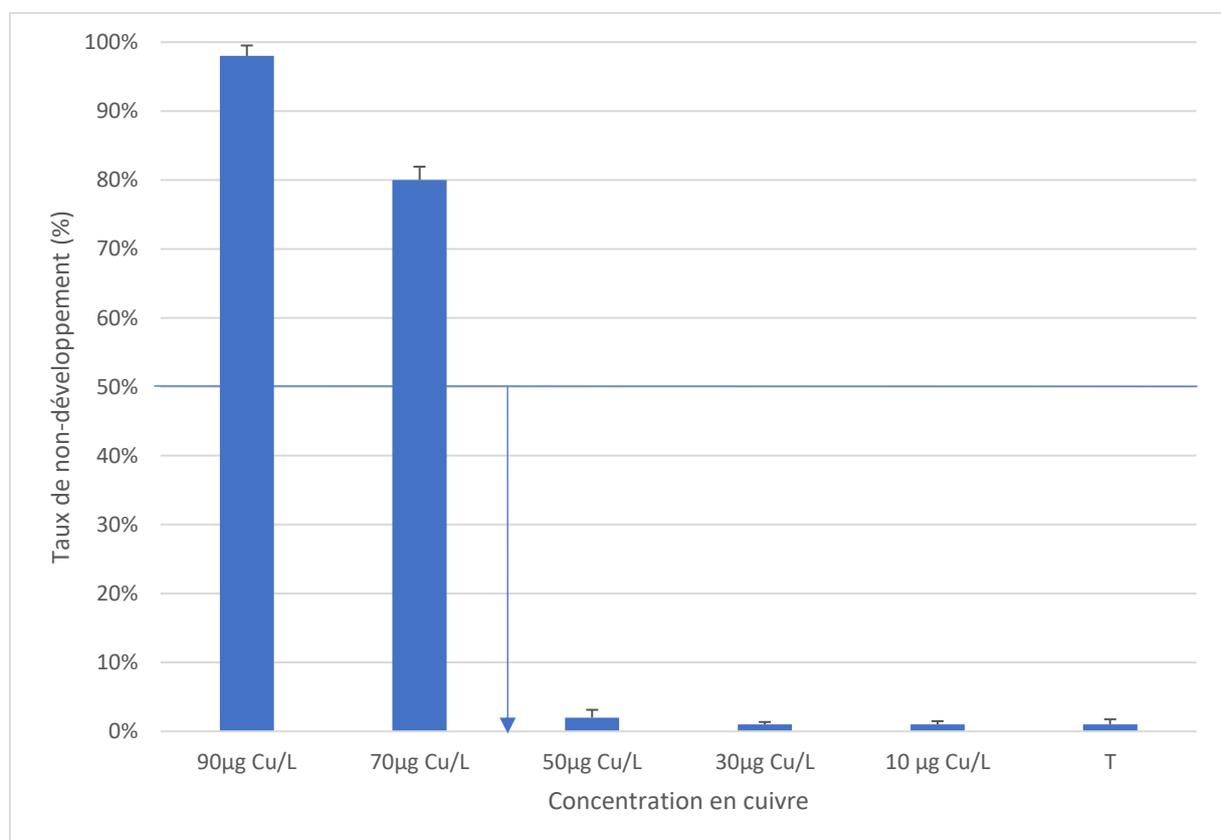


Figure 3 – Taux de non développement dans la gamme cuivre et CL₅₀ à 24h

Pourcentage de larves non développées (Fig. 3) :

Le produit est létal pour les concentrations égales et supérieures à 70µg Cu/L. La concentration létale à 24h (CL₅₀24h) est comprise entre 50µg Cu/L et 70µg Cu/L. Pour les concentrations 30µg Cu/L et 10µg Cu/L, des larves ne présentant pas de malformations ont pu être observées et mesurées. Le témoin quant à lui présente un taux de non-développement de 1%.

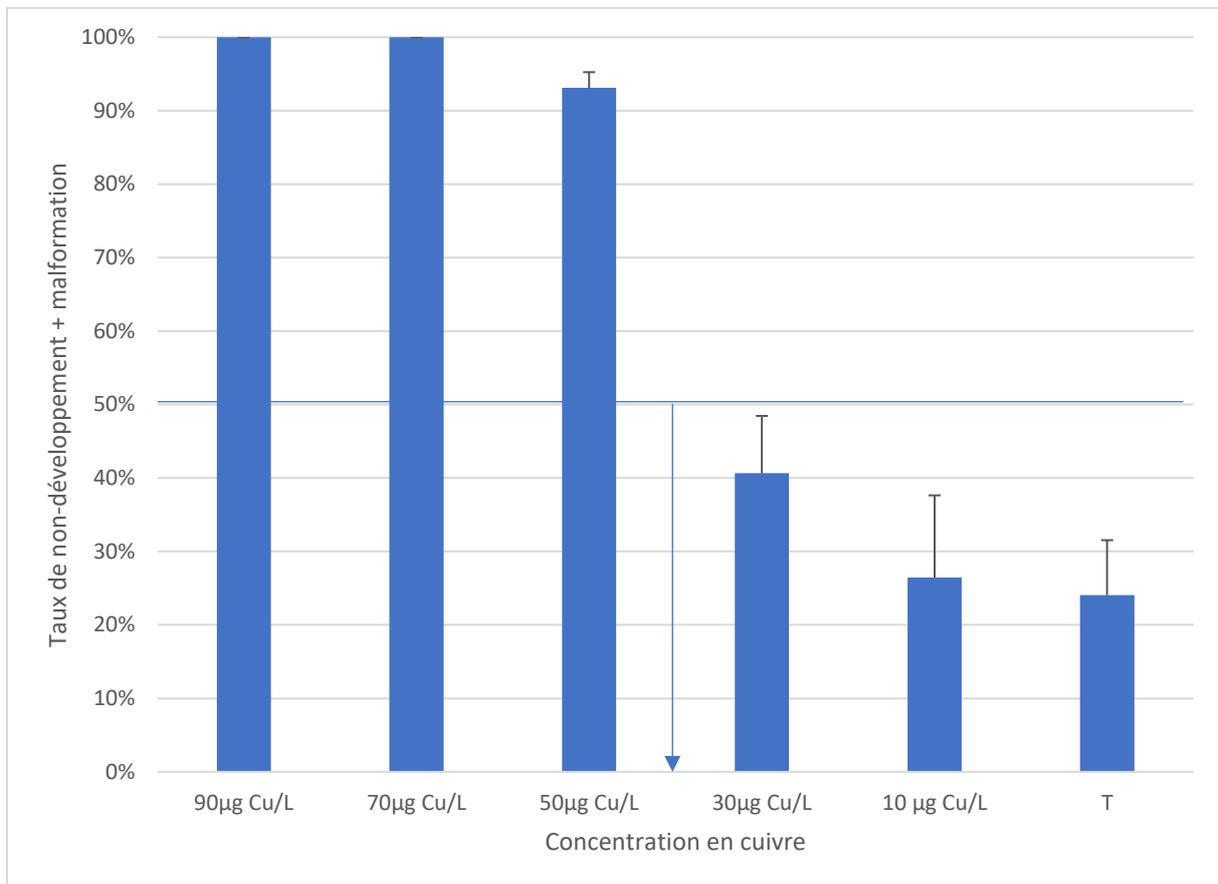


Figure 4 - Taux de non développement et de malformation dans la gamme de cuivre et CL₅₀ à 72h

Pourcentage de larves non développées et malformées (Fig. 4) :

Le produit est létal pour les concentrations égales et supérieures à 50µg Cu/L. La CL₅₀ à 72h est comprise entre 30µg Cu/L et 50µg Cu/L. La concentration 10µg Cu/L présente un taux de non-développement et de malformations cumulés de 26%, qui n'est pas significativement différent du témoin (24%) ($p > 0,05$).

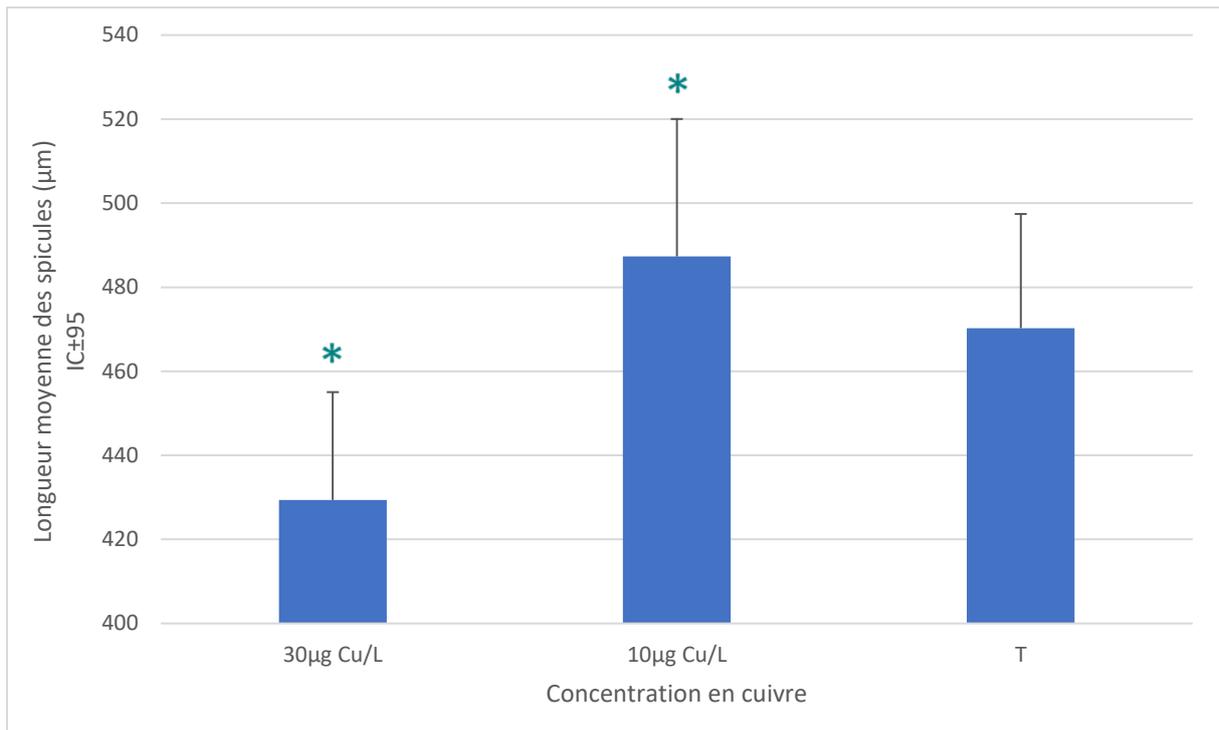


Figure 5 - Longueur moyenne des spicules (IC±95) dans la gamme de cuivre

Longueur moyenne des spicules (Fig.5) :

La longueur moyenne des spicules n'a pu être mesurée que sur les concentrations 30µg Cu/L et 10µg Cu/L. Elles sont en moyenne de 429µm pour la concentration 30µg Cu/L, 487µm pour la concentration 10µg Cu/L et 470µm pour le témoin eau de mer. Ces deux concentrations sont significativement différentes entre elles, mais aussi significativement différentes du témoin ($p < 0,05$).

3.1.2 Comparaison entre les échantillons :

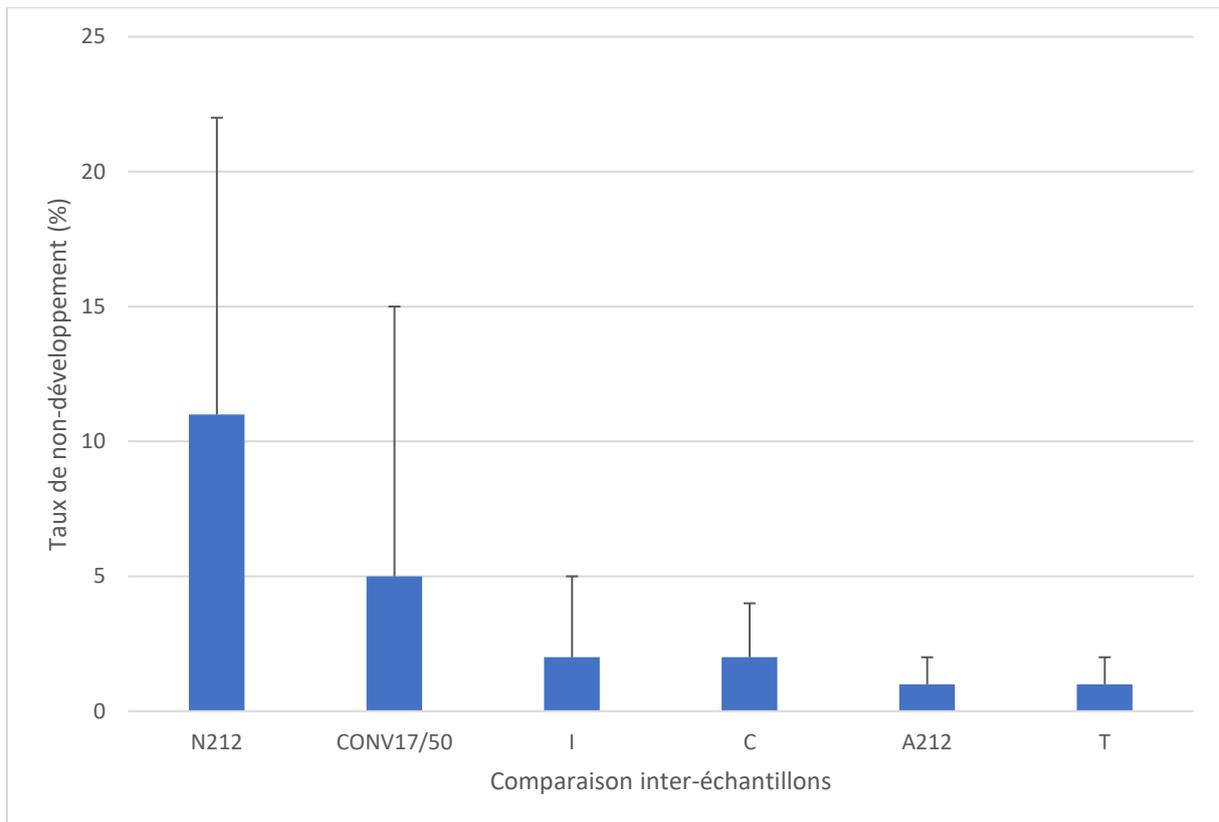


Figure 6 - Comparaison des taux de non-développement entre les échantillons

Pourcentage de larves non développées (Fig.6) :

L'échantillon N212 présente le taux le plus élevé de larves non-développées (11%). L'échantillon CONV17/50 présente un taux de non développement de 5%. Les échantillons I et C font état d'un taux de non-développement de 2%, et l'échantillon A212 présente un taux de non-développement égal au témoin (T) (1%). Aucun de ces taux n'est significativement différent du témoin ($p > 0,05$), cependant, au regard des écart-types importants, il existe une grande variabilité dans les résultats.

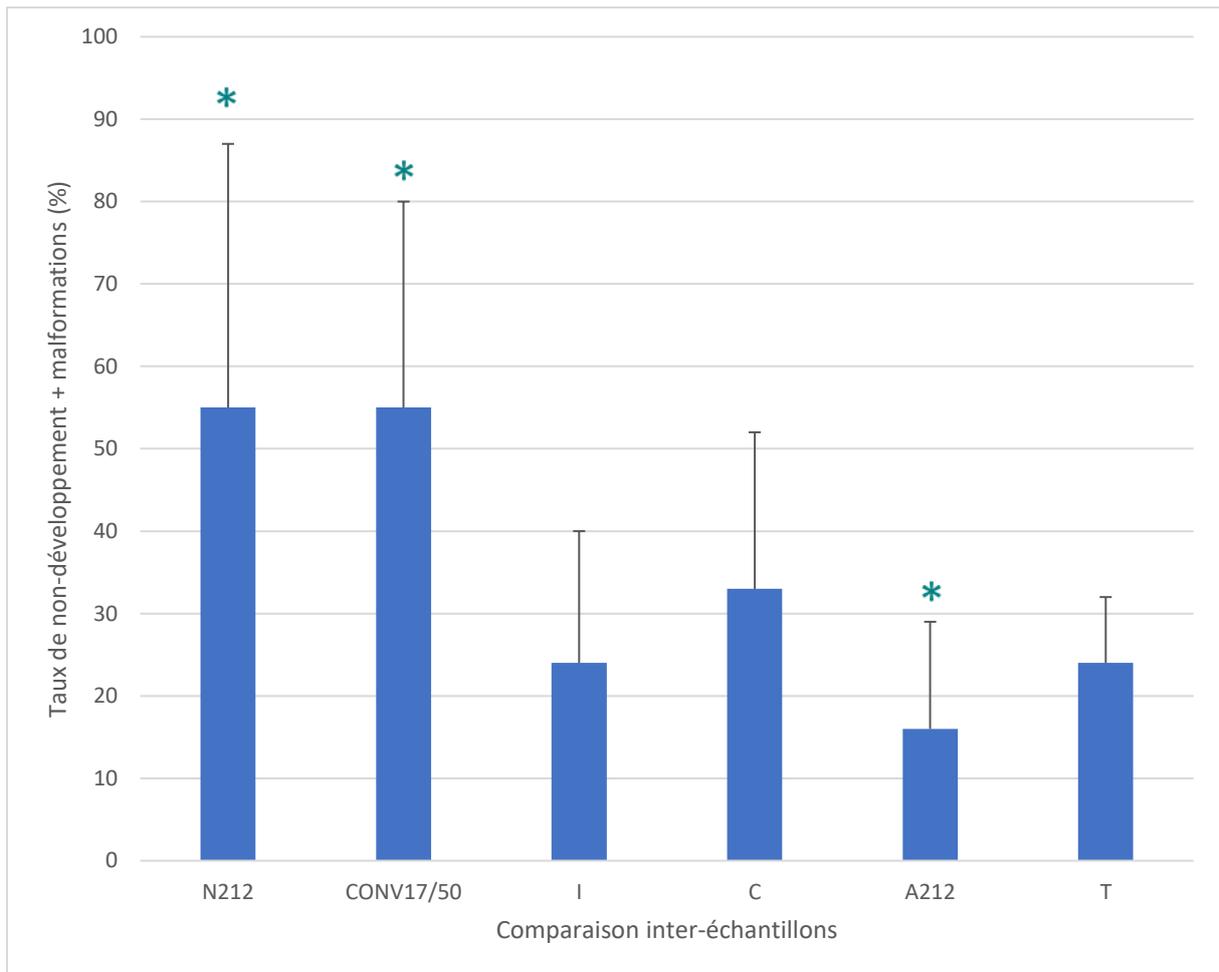


Figure 7 - Comparaison des taux de non-développement et de malformation entre les échantillons

Pourcentage de larves non développées et malformées (Fig.7) :

Les échantillons N212 et CONV17/50 présentent chacun un taux cumulé de non-développement et de malformation de 55%. De plus, ils sont tous les deux significativement différents de l'échantillon A212 ($p < 0,05$), mais pas significativement différents du témoin ($p > 0,05$). Les échantillons C (33%), I (24%) et A212 (16%) ne présentent pas de différence significative par rapport au témoin (T ; 24%) ($p > 0,05$).

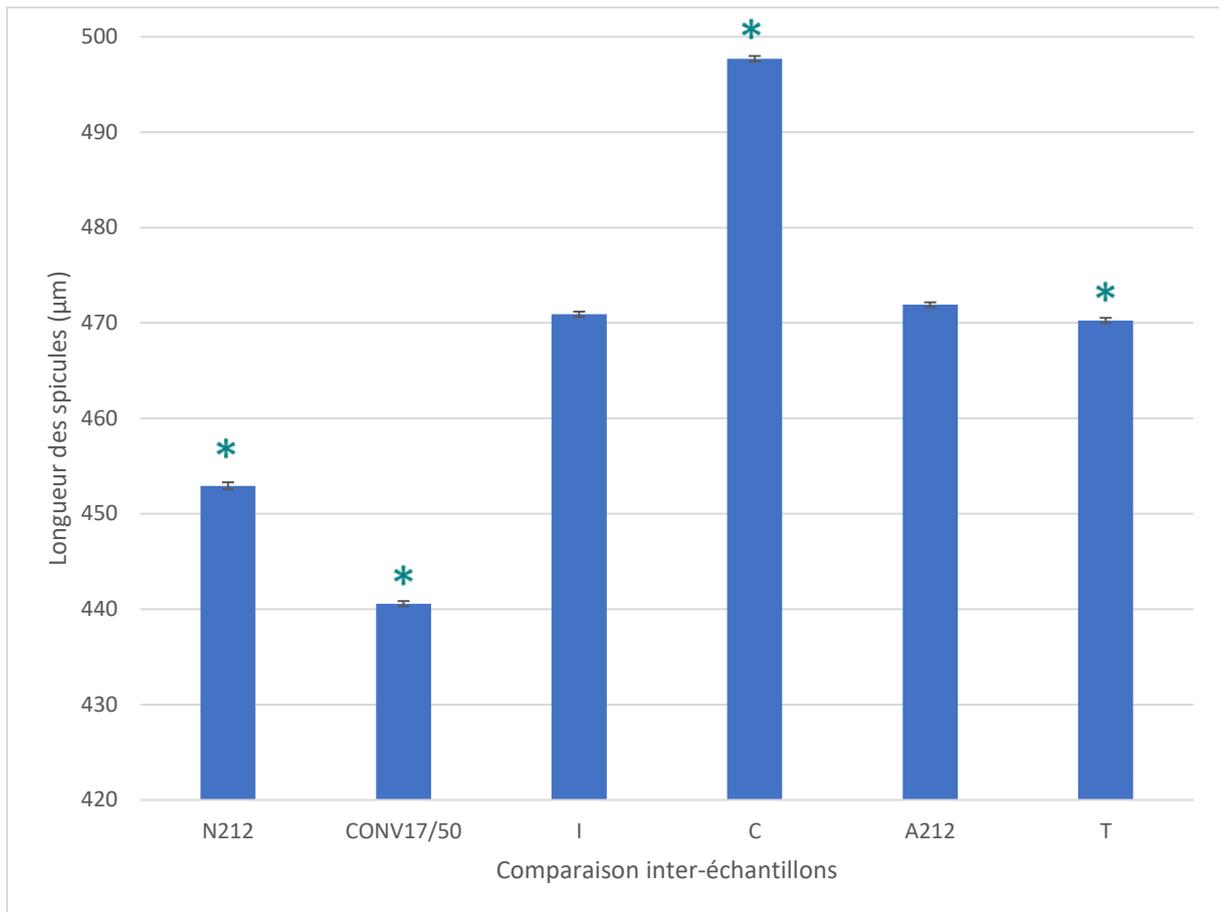


Figure 8 - Comparaison des longueurs moyennes des spicules ($IC\pm 95$) entre les échantillons

Longueur moyenne des spicules (Fig.8) :

La longueur des spicules a pu être mesurée sur tous les échantillons et est en moyenne de 452,927µm pour l'échantillon N212, 440,576µm pour l'échantillon CONV17/50, 470,915µm pour l'échantillon I, 497,701µm pour l'échantillon C, et 471,909µm pour l'échantillon A212. Néanmoins, seuls les échantillons C, CONV17/50 et N212 présentent une différence significative avec le témoin (T ; 470,260µm) ($p < 0,05$).

3.1.3 Gradient de toxicité du test :

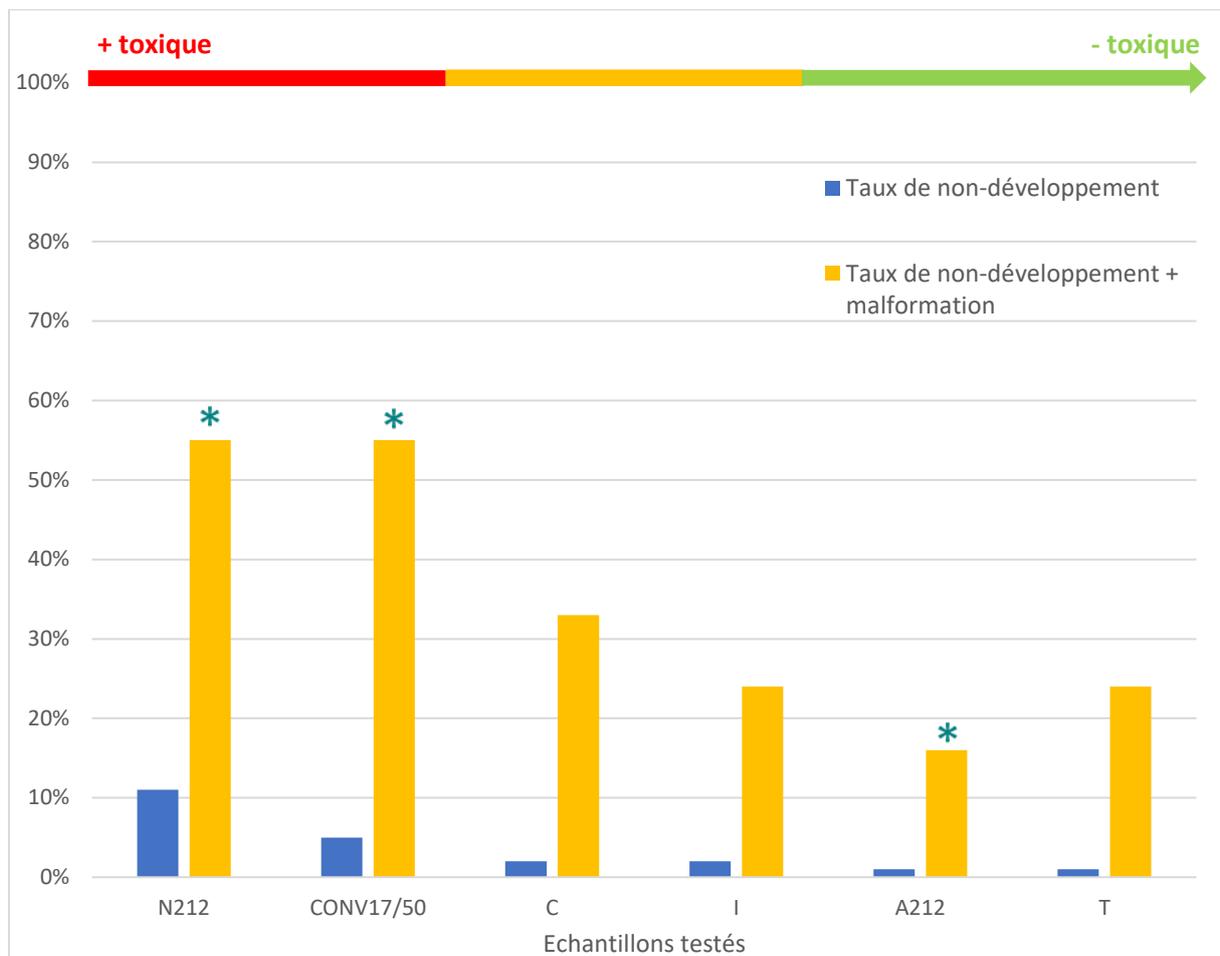


Figure 9 - Gradient de toxicité pour les cinq échantillons testés

Gradient de toxicité (Fig.9) :

L'échantillon N212 est donc l'échantillon impactant le plus les larves au regard du taux de non-développement (11%). Cependant, au regard du taux de non-développement cumulé au taux de malformation, il est aussi impactant pour les larves que l'échantillon CONV17/50 (55%), et ils sont tous les deux significativement différents de l'échantillon A212. Viennent ensuite respectivement les échantillons C, I et A212, ne présentant ni un taux de non-développement ni un taux cumulé de non-développement et de malformation significativement différent du témoin.

3.2 Comparaison écotoxicité filets de catinage tricotés

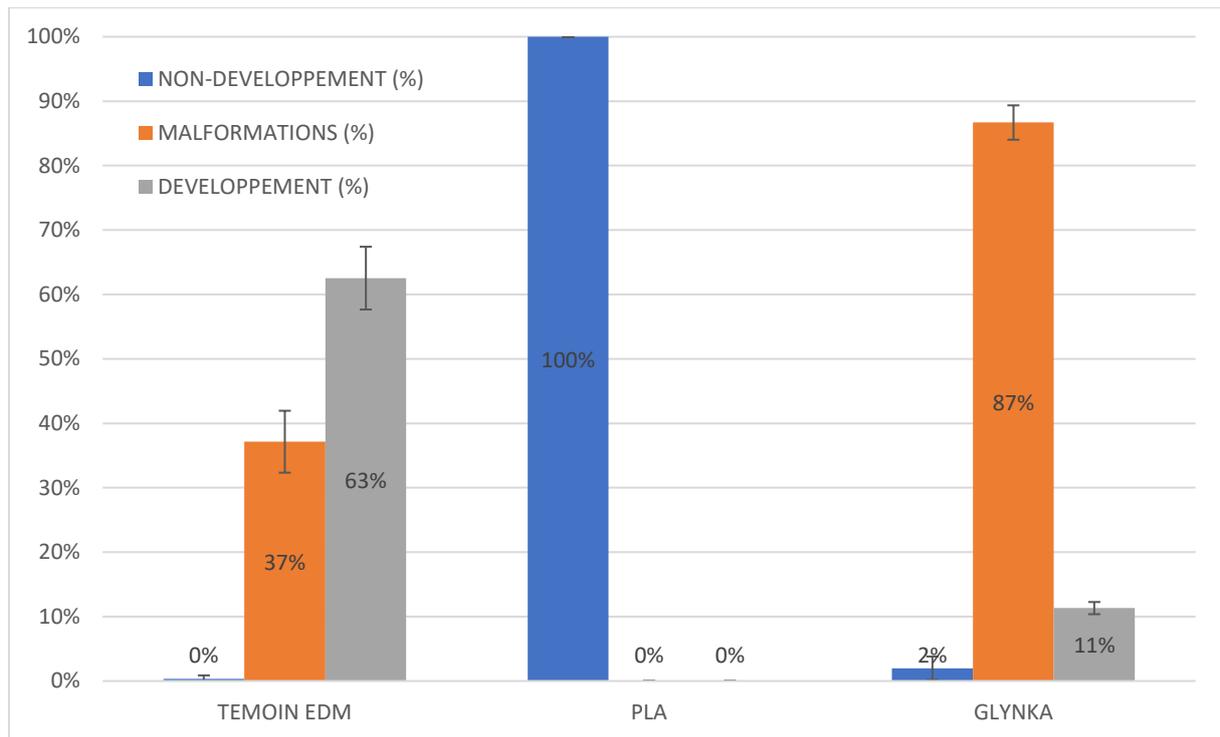


Figure 10 : Test-écotoxicologique sur larves d'oursins *P. lividus* du 07/07/2023

L'échantillon 2 – PLA+coton présente un taux de non-développement de 100%, significativement différent du témoin.

L'échantillon 3 – GLYNKA présente un taux de non-développement de 2%, un taux de malformation de 87% significativement différent du témoin, et un taux de développement de 11% significativement différent du témoin.

IV. Discussion

Dans un contexte où le marché des bioplastiques est en pleine expansion, et où ces matériaux sont amenés à être utilisés dans une filière d'élevage et de production de produits de la mer, il est nécessaire de s'assurer que ces nouvelles matières ne sont pas toxiques pour les organismes marins dans le cadre de leur biodégradation. Les objectifs de cette étude étaient de déterminer si les biomatériaux testés sont nocifs en utilisant la larve d'oursins de l'espèce *Paracentrotus lividus*, espèce bio-indicatrice largement utilisée en écotoxicologie, principalement au cours de leur phase endotrophe (Bougis, 1967). Ces biomatériaux ont été comparés avec des matériaux conventionnels en Polyéthylène (PE), et un témoin positif en utilisant une gamme de cuivre (Cu), le cuivre étant couramment utilisé dans la littérature pour son effet rapide et à faible dose sur les organismes étudiés (Bougis, 1967), (Volpi Ghirardini, Arizzi Novelli, Losso, & Ghetti, 2005), (S. Pétinay et al., 2009).

La gamme de cuivre, en tant que témoin positif, permet de valider la méthode du présent essai. En effet, des malformations ont été observées sur les larves à partir de 30µg Cu/L (40%) et ce taux est significativement différent par rapport au témoin ($p < 0,05$). Pour la concentration à 50µg Cu/L, le taux de larves malformées est monté à 91%, et est significativement différent du témoin ($p < 0,05$). Au-delà, pour les concentrations à 70µg Cu/L et 90µg Cu/L, aucune larve n'a pu se développer. Des effets similaires ont été observés dans la phase d'évaluation de la toxicité du cuivre de la méthode de

standardisation utilisée (S. Pétinay et al., 2009). Les résultats de la présente étude sont similaires et ces différents éléments permettent de valider le contrôle positif de ce bio-essai et ainsi valider le test dans sa totalité.

Aussi, comme les deux expérimentations entre filets de catinage extrudés et tricotés ont été réalisées séparément, il est impossible de comparer ces résultats, trop de paramètres ayant changés. En premier lieu les larves ne sont pas issues des mêmes géniteurs, le patrimoine génétique n'est donc pas comparable. Enfin, la qualité d'une eau de mer évoluant très rapidement, les lixiviats n'auront pas été soumis aux mêmes paramètres physico-chimiques, ce qui rends la comparaison d'autant plus difficile. Les discussions des résultats d'écotoxicité des filets de catinage extrudés et de catinage tricotés sont donc présentées séparément.

4.1 Discussion filets de catinage extrudés

Les polymères, qu'ils soient conventionnels ou biosourcés, sont mélangés à des additifs afin de leur donner les propriétés mécaniques attendues (résistance, élasticité, ténacité etc.). Ainsi, plutôt que de tester individuellement chaque additif, il est intéressant de tester les lixiviats issus des matériaux afin d'évaluer les effets de ces mélanges (Zimmermann, Göttlich, Oehlmann, Wagner, & Völker, 2020). D'après les résultats obtenus dans cette étude, il a été montré que, parmi les filets extrudés, l'échantillon N212 est celui qui a le plus dégradé la qualité de l'eau et impacté les larves, tant sur la survie à 24h que sur le développement à 72h. A contrario, les lixiviats de l'échantillon A212, de même composition, présentent les meilleurs résultats de l'étude. De ce fait, le filet ayant subi un stockage d'une durée d'un an présente moins d'impact pour la qualité de l'eau testée que le filet neuf. Comme expliqué auparavant, N212 est un échantillon sorti d'usine, et A212 a été stocké durant un an dans un entrepôt, à l'abri de la lumière et de l'humidité. Il a été démontré, par l'analyse chimique et la comparaison entre des lixiviats issus de nouveaux matériaux et les lixiviats issus de matériaux usagés, que les concentrations en phtalates (plastifiant) dans le lixiviat d'un nouveau matériau sont 12 à 21 fois supérieures aux concentrations relevées dans le lixiviat d'un matériau usagé (Gardon, et al., 2020). Toutefois, il est à noter que ces lixiviats sont issus de plastiques conventionnels (PP et PE) et que l'ajout d'additifs dans des formulations biodégradables est réglementé et ne doit pas excéder 5% du poids de la matière sèche, et que chaque composant soit ajouté dans des taux inférieurs ou égaux à 1% du poids de la matière sèche initiale (Norme EN 13432). Malgré tout, il semble que la toxicité des lixiviats issus de matériaux neufs soit donc liée aux additifs, et celle des matériaux usagés soit liée aux contaminants environnementaux adsorbés par les matériaux (Carli, 2021). Ceci pourrait expliquer pourquoi l'échantillon N212 est très proche de l'échantillon CONV17/50 au regard du taux de survie et de non-développement à 72h (*Fig.7*), sachant que cet échantillon est neuf et est composé de Polyéthylène (PE). Les résultats sont tout de même à interpréter avec mesure, au vu des écarts-type présents sur le graphique (*Fig.7*), et il serait intéressant de renouveler cette expérimentation avec un nombre de réplicats plus élevé.

Toutefois, ces observations se retrouvent lors de l'établissement du gradient de toxicité (*Fig.9*). En effet, le taux de non-développement des larves est le critère le plus important pour constituer un gradient de toxicité des échantillons testés. En effet, les larves restées au stade œuf fécondé, blastula ou gastrula, sont des larves mortes avant 24 heures (Falugi & Angelini, 2002). Selon cette indication, plus la moyenne du taux de non-développement est élevée, plus le produit testé est impactant pour les larves.

Le taux de malformation est le second critère important permettant d'affiner le gradient. Les larves avec des malformations sont des larves présentant des spicules absentes ou incomplètes, ou encore des spicules croisées ou écartées, et ce à 72h d'exposition (Carballeira C., Ramos-Gomez, Martin-Diaz, & DelValls, 2012). Le taux de non-développement seul ne permettait pas d'observer de différence significative entre les échantillons, mais le cumul du taux de non-développement avec le taux de

malformation a permis de mettre au jour des différences entre certains échantillons. Aux dires d'experts, le critère pour évaluer une toxicité se résume à déterminer si un organisme est viable ou non-viable après une exposition à un agent toxique. De ce fait, la présence de malformation relevées à 72h induit un développement altéré par l'agent toxique. Plus ce taux est élevé, moins les organismes seront viables. Le cumul de ces taux permet donc d'estimer la part de mortalité et de malformation induisant une non-viabilité des organismes à 72h d'exposition. De plus, il a été démontré que l'exposition à des lixiviats issus de polymères pétrosourcés conduisent à des développements anormaux, qui conduiront probablement à des larves non-viables (Rendell-Bhatti, Paganos, & et al., 2020). L'établissement de ce gradient permet d'observer de façon claire un classement des échantillons testés et notamment l'impact non-significatif des échantillons biosourcés sur la survie et le développement des larves.

La longueur des spicules confirme le gradient de toxicité car les deux échantillons conventionnels (C ; CONV17/50) et un échantillon biosourcé (N212) présentent une différence significative avec le témoin, signifiant que les lixiviats ont eu un impact sur la croissance des larves bien développées. Ces trois échantillons sont les plus impactant pour les larves au regard du gradient (*Fig.9*). La longueur des spicules se situant entre 440µm et 497µm, cela correspond à la longueur de référence dans une eau de mer reconstituée, soit environ 500µm (S. Pétinay et al., 2009).

Ces résultats sont toutefois à interpréter avec mesure, au vu des écarts types présents sur les graphiques (*Fig.6 et 7*). En effet, les résultats obtenus présentent une grande variabilité entre eux et le nombre de valeurs récoltées peut ne pas être suffisant pour assurer une bonne robustesse du jeu de données. De plus, certaines valeurs aberrantes ont dû être retirées de la base de données. Lors de l'observation, certaines boîtes ne contenaient pas de larves, une erreur de manipulation peut en être la cause. Le jeu de données est donc utilisable mais peut présenter une certaine faiblesse statistique qui doit être prise en compte dans l'analyse.

L'échantillon I, soit le prototype biosourcé produit par la société Intermas, présente de très bons résultats, tant sur le non-développement à 24h (*Fig.6*) que sur le non-développement et les malformations à 72h (*Fig.7*). Testé en 2019 selon la même méthode, mais sur une durée de balnéation moins importante (quinze jours seulement), il avait déjà présenté de très bons résultats et n'avait pas un impact sur les larves significativement différent du témoin ($p < 0,05$, Annexe VI) (Hégron, 2019). Les résultats de cette présente étude sont particulièrement similaires et les larves, même sur une durée de balnéation trois fois plus longue, ne sont pas négativement impactées par ce matériau. Comme décrit précédemment, cet échantillon est composé d'un mélange de PLA et de PBAT, de la marque Ecovio de BASF. Malgré que les études expérimentales à propos de la biodégradation des polymères en eau de mer soient limitées en nombre, ceci tout en gardant à l'esprit que chaque polymère a ses caractéristiques propres (Kershaw, 2015), les mécanismes de biodégradation du PLA et du PBAT ont fait l'objet de plusieurs études.

Le PLA, ou polyactide, est issu de la biomasse, donc biosourcé, et biodégradable à minima en conditions de compost industriel à 58°C (*Fig.1*) (Gontard, Bruzard, & Ghiglione, 2019). Les essais menés pour tester sa biodégradation en compostage industriel ont montré que le prototype d'Intermas devient cassant en un mois et se fragmente à partir de deux mois. Cette rapidité de dégradation est due notamment à l'activité microbienne qui résulte de la forte montée en température (+ 70°C) de l'andain pendant sa première phase de fermentation (Maheut, 2020). En milieu aqueux, le processus de dégradation est légèrement différent puisque l'eau absorbée plastifie le PLA puis hydrolyse les liaisons esters. Cette action raccourci les chaînes moléculaires, qui sont dégradées en surface par des bactéries. Ensuite, les microorganismes peuvent bio-assimiler les fragments de PLA. En revanche, les tests réalisés sont communément effectués à une température de 25°C, afin d'accélérer le processus

de vieillissement du matériau. Les taux de biodégradation atteignent alors 50% pour environ 270 jours d'incubation (Deroine, 2014). Afin d'obtenir des résultats plus représentatifs du milieu, des tests sont réalisés dans un milieu d'eau distillée maintenu à 13°C, jusqu'à ce que l'échantillon atteigne une déformation à la rupture de 40%. Selon ces calculs, il faudrait onze ans pour atteindre 40% de biodégradation (Deroine, 2014). C'est toutefois bien moins long qu'un polymère pétrosourcé, et l'application prévue ici pour la mytiliculture convient tout à fait à la durée d'utilisation estimée du PLA. En revanche, étant donné la durée de biodégradation évoquée précédemment et les paramètres de température utilisés, il est possible que la durée de balnéation de la présente étude (45 jours) et la température utilisée (14°C) n'aient pas été suffisantes à l'échantillon pour entamer un processus de dégradation, et ainsi impacter le développement des larves.

Ce sont là les limites de la présente étude. Le choix de maintenir la température constante à 14°C s'explique par la volonté de pallier à un phénomène d'évaporation de l'eau de mer observé lors de l'étude réalisée en 2019. En effet, les bouteilles ayant été placées à l'extérieur, la température a varié de 10°C à 37°C, provoquant par la même occasion une augmentation de la salinité jusqu'à 43ppt. Un réajustement à l'eau distillée avait alors été nécessaire. Ce maintien de la température à 14°C n'a pas permis d'éviter un réajustement de la salinité à l'eau distillée (maximum relevé 36ppt), mais a largement contribué à contenir ce phénomène d'évaporation. Cependant, cette température a pu ralentir le relargage d'éléments nocifs dans les lixiviats, puisqu'il a été démontré qu'un milieu d'incubation plus chaud accélère la dégradation d'un polymère (Deroine, 2014). Une solution envisageable pourrait être de relancer l'expérimentation à une température un peu plus élevée mais de réduire la durée d'incubation pour limiter l'effet de l'évaporation. Toutefois, rien ne permet d'assurer que ce choix serait efficace. De plus, la durée d'incubation est aussi à discuter. Après avoir obtenu certaines réponses significatives suite à l'étude de 2019 en seulement quinze jours de trempage, mais pour pallier au refroidissement du milieu d'incubation, il a été décidé d'allonger la période à 45 jours. En effet, les méthodes d'évaluation de la biodégradabilité en milieu aqueux et notamment la méthode par analyse du dioxyde de carbone libéré se basent sur une durée d'incubation de 28 à 60 jours (Norme ISO 19679 :2016/22404 :2019). Concernant l'utilisation de matériel en verre, ce choix s'explique par la volonté de contrôler les contaminations extérieures, en revanche, rien n'a été mis en place afin de limiter la contamination potentiellement amenée via l'aération. Une des solutions envisageables pourrait être de prévoir un filtre à air en amont afin de contrôler aussi ce paramètre. Enfin, la quantité de matière utilisée est la même que celle utilisée en 2019, mais cette quantité a été choisie arbitrairement (Hégron, 2019). Il serait judicieux d'augmenter la quantité de plastique utilisée pour obtenir les lixiviats, puisque 250g de plastique (PP, ABS, PVC rigide et PEHD) par litre d'eau sont nécessaires pour obtenir des effets sur 50% des organismes testés (*Daphnia magna*) (Lithner, Nordensvan, & Göran, 2012), et 50g de microplastiques issus de cordes et de coupelles en PP et PE sont nécessaires pour produire un effet sur des larves d'huîtres perlières (*Pinctada margaritifera*) (Gardon, et al., 2020). Les quantités utilisées ici sont donc bien inférieures à la littérature, néanmoins, au vu des résultats obtenus, il est envisageable de renouveler l'expérience avec une quantité supérieure de matière afin de pouvoir comparer plus en profondeur les résultats avec les études réalisées par le passé.

4.2 Discussion filets de catinage tricotés

Il est difficile de conclure sur cette expérimentation, en premier lieu eu égard aux résultats du témoin eau de mer de référence qui présente lui aussi un taux de malformations assez élevé (37%). Toutefois, les résultats des deux échantillons testés semblent indiquer une toxicité pour les organismes, en revanche la cause n'en est pas établie. Il serait intéressant d'approfondir les tests en modifiant quelques paramètres, tel qu'inclure une filtration de l'eau testée avant mise en contact avec les organismes.

I. Conclusion

Les objectifs de cette étude étaient de vérifier si les lixiviats issus de la dégradation de filets de catinage biosourcés auraient ou non un impact sur la survie et le développement des larves d'oursins de l'espèce *Paracentrotus lividus*, indicateur d'évaluation de la qualité globale d'une eau. Cette expérimentation visait à poursuivre l'acquisition de données à propos de l'impact de la biodégradation des plastiques biosourcés sur les organismes marins, et ainsi permettre l'amélioration de la conception des produits, tout en soutenant la volonté d'innovation éco-responsable de la profession.

Les résultats, et notamment le gradient de toxicité (Fig.9), permettent de vérifier l'hypothèse selon laquelle les lixiviats n'auraient pas d'impact sur les larves pour deux des trois échantillons biosourcés. L'échantillon produit par la société Intermas et l'échantillon vieilli produit par la société Seabird n'ont pas montré de différence significative avec le témoin. L'échantillon neuf produit par Seabird a quant à lui montré un impact significatif sur la survie et le développement des larves. Ceci s'explique probablement par la présence des additifs et des résidus de fabrication qui n'ont pas eu le temps de se désorber contrairement à l'échantillon vieilli.

L'évaluation et la certification des matériaux biodégradables sont soumises au respect de plusieurs facteurs, tels que la composition chimique, l'aptitude à la biodégradabilité et à la désintégration, et l'écotoxicité. Afin de pouvoir contrôler ces paramètres en laboratoire, une « boîte à outils dégradabilité » a été réfléchi au cours du projet Gestion des Biomasses Mytilicoles (Blin & et al, 2022). Cette boîte à outils regroupe plusieurs essais :

- Tests de résistance mécanique.
- Essais d'écotoxicité sur les larves d'oursins *P.lividus*.
- Estimation de la perte de masse.

Les premiers résultats d'essais avaient montré que la résistance mécanique du filet de catinage diminuait sous l'effet des UV et de l'abrasion liée au mouvement de l'eau, tout en s'accroissant dans le temps (Annexe VII, Fig. 15 et Fig.16). De plus, il a été montré que cette perte de résistance est corrélée positivement avec les niveaux bathymétriques d'élevage (Annexe VII, Fig.17) (Blin & et al, 2022). Ces résultats, couplés aux résultats obtenus ici sur le test du même filet de catinage (C), tendent à indiquer que le filet, perdant en résistance mécanique, se dégrade et évacue dans l'eau des substances potentiellement toxiques pour les organismes.

De ce fait, et au vu des résultats obtenus, il serait tout à fait pertinent d'adapter cette boîte à outils à un matériau biosourcé. L'association des essais d'écotoxicité à différents pas de temps couplés aux tests de résistance mécanique permettrait d'étayer scientifiquement le caractère biodégradable du matériau et son innocuité pour les organismes marins, tout en rassurant les professionnels sur l'aptitude du matériau à être performant sur la durée d'un cycle d'élevage.

Car c'est finalement tout l'objectif de ces essais. Prouver aux professionnels qu'un filet de catinage biosourcé et biodégradable remplit la même fonction qu'un filet de catinage conventionnel, tout en étant respectueux de l'environnement et en contribuant à réduire la part de déchets plastiques produite par le secteur de la conchyliculture est un défi en soi. C'est pourquoi ces études sont indispensables afin que de plus en plus de professionnels prennent confiance en ces nouveaux matériaux et généralisent leur utilisation.

Annexes

Annexe I

Annexe I



Figure 11 - Photographies des échantillons testés

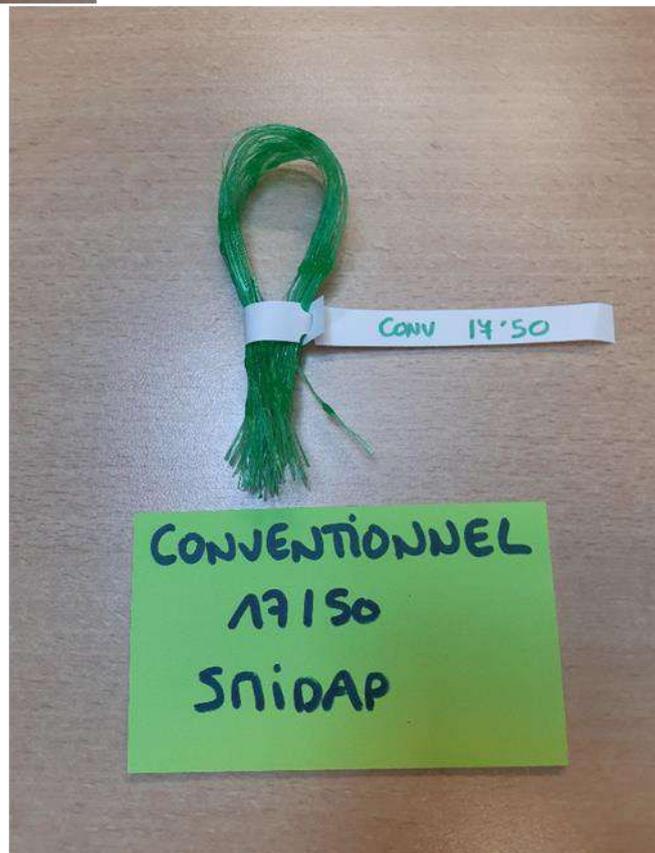


Figure 12 - Photographies des échantillons testés

Annexe II

Tableau 2 - Analyse Infra-Rouge de l'échantillon C - Conventionnel LACQTENE - CompositIC

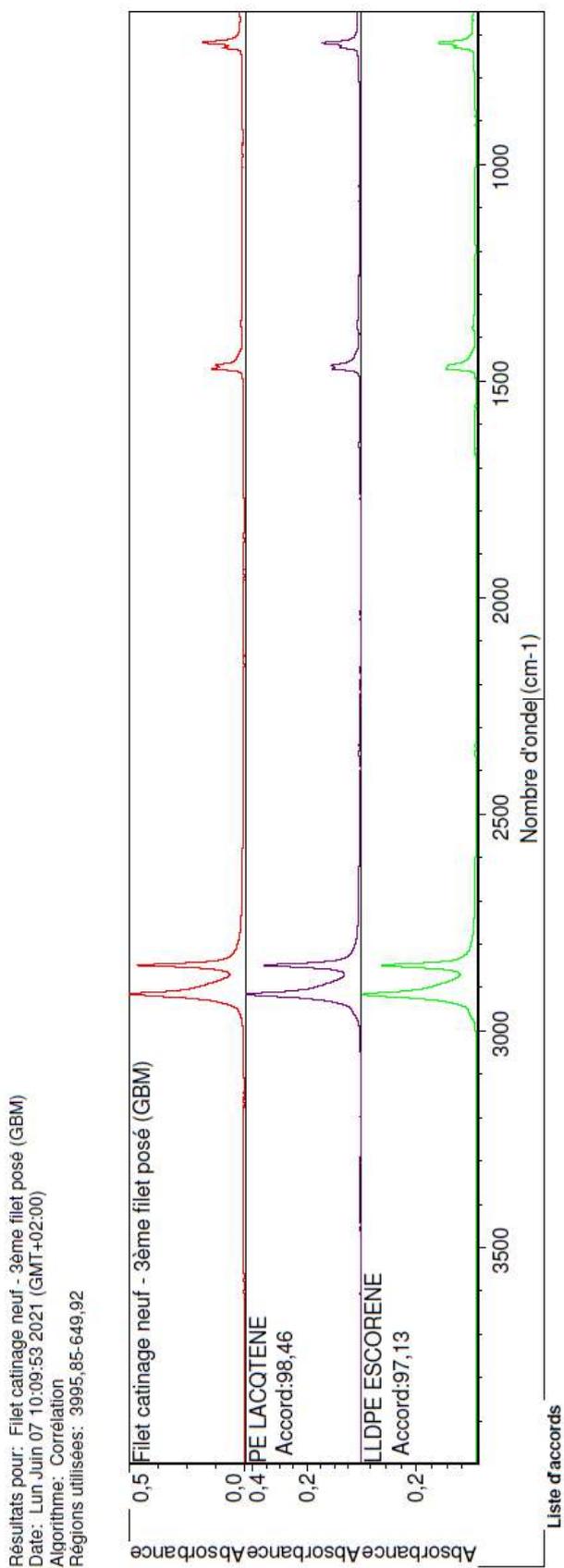
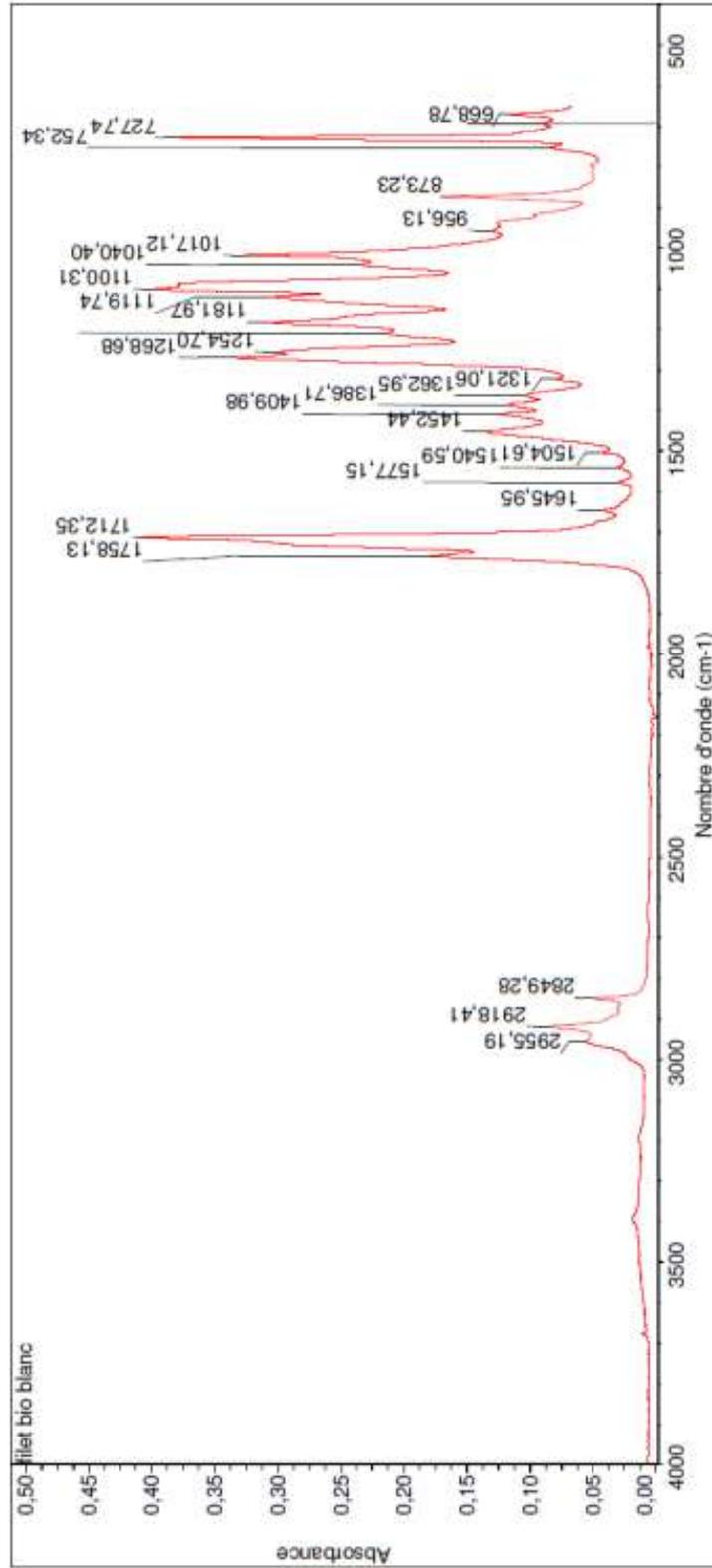


Tableau 3 - Analyse Infra-Rouge de l'échantillon I - Intermas - ECOVIO - ComposiTIC

→ Analyse Infra-Rouge : IRTF

■ **Filet mytilicole bio**



Correspondance à 94,8% avec de l'Ecovio de BASF (mélange composé de PBAT et PLA)

Tableau 4 - Analyse Infra-Rouge de l'échantillon Sea212 - Seabird

i. SPECTROSCOPIE INFRAROUGE A TRANSFORMEEE DE FOURRIER

Groupements caractéristiques	Longueur d'onde (cm ⁻¹)
C=O ester	1700-1740
C-O ester	1300-1000
C-H élongation	2850-3000 / 1450-1500
CH ₃ CH ₂ déformation	700-730 / 1350-1400

Tableau 11 : Groupements caractéristiques chimiques identifiés sur les échantillons non vieillis

- 1) La matière Sea212 de Seabird est bien composée d'un mélange de 2 biopolyesters, comme indiqué s la fiche technique de cette matière.

Annexe V

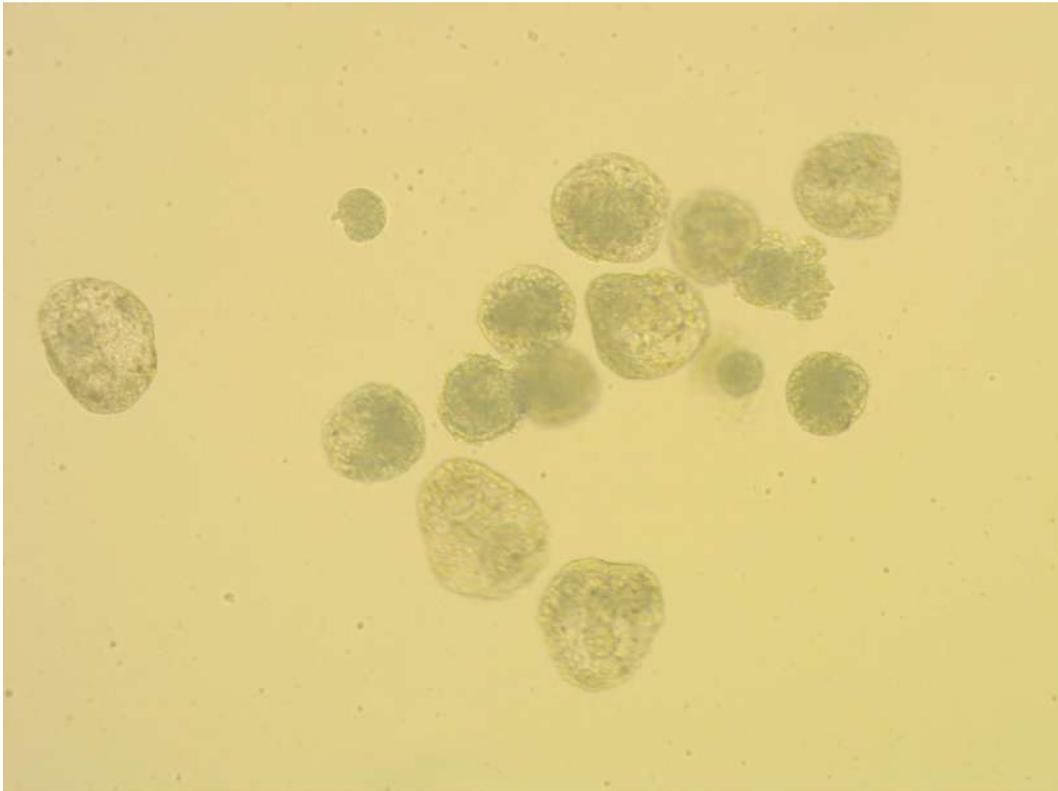


Figure 13 - Larves non-développées

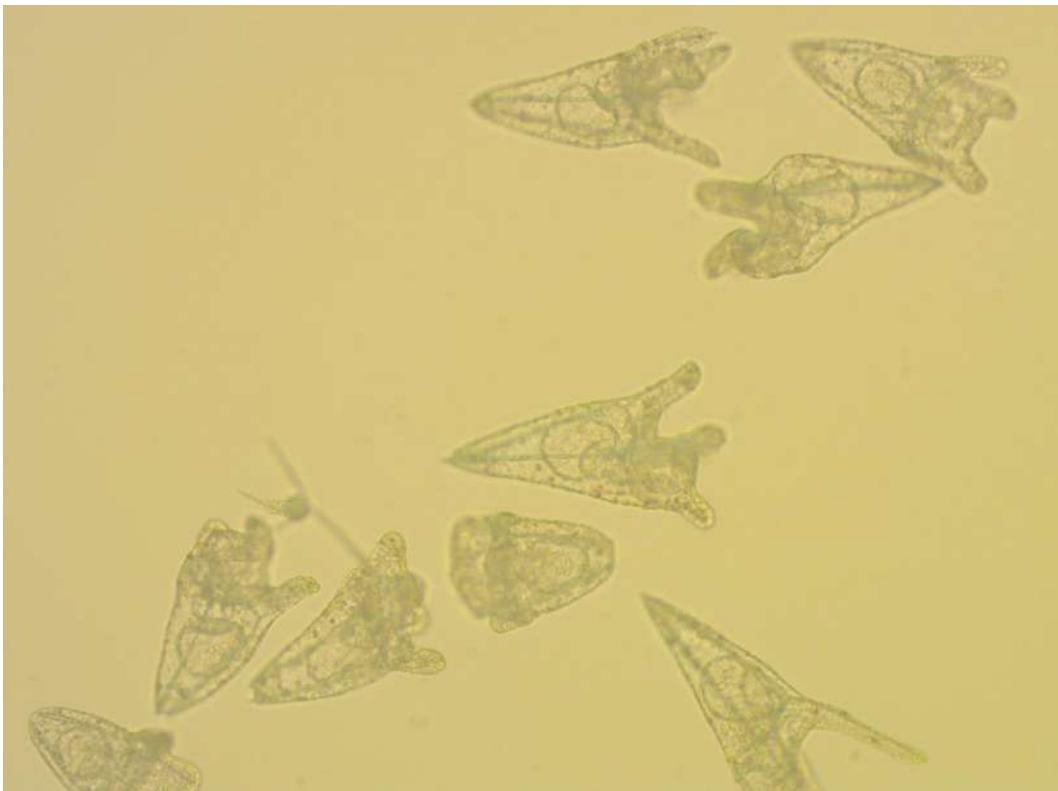


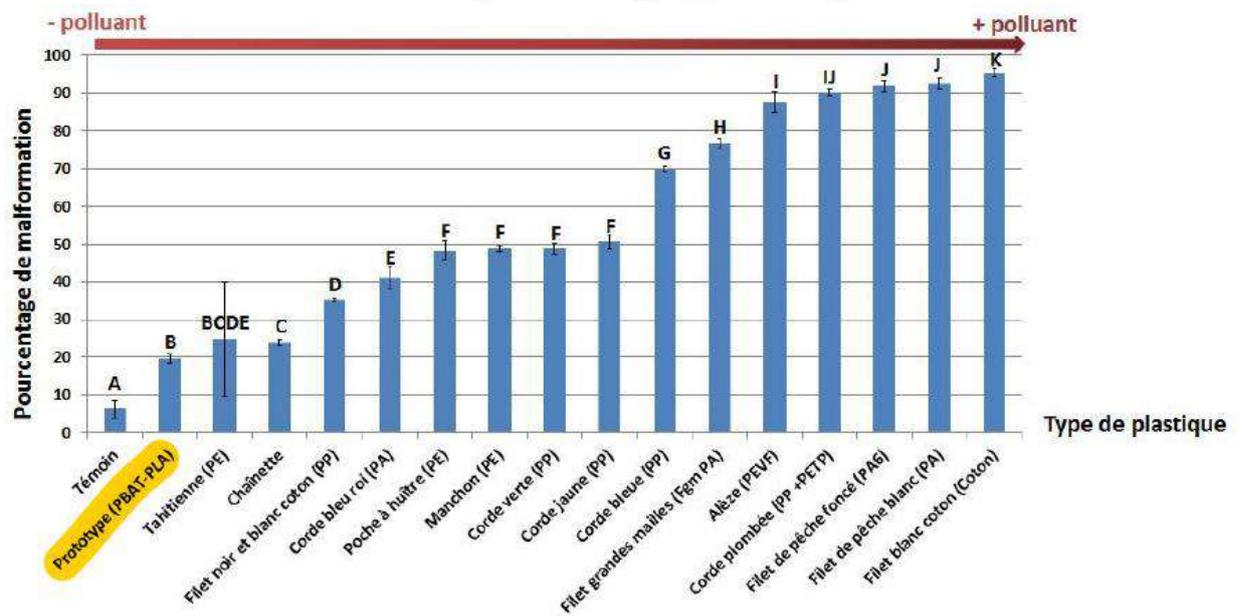
Figure 14 - Larves malformées



Figure 15 - Larves bien développées

Annexe VI

Tableau 5 - Hégron A., 2019. Gradient de toxicité incluant l'échantillon d'Intermas (en jaune)



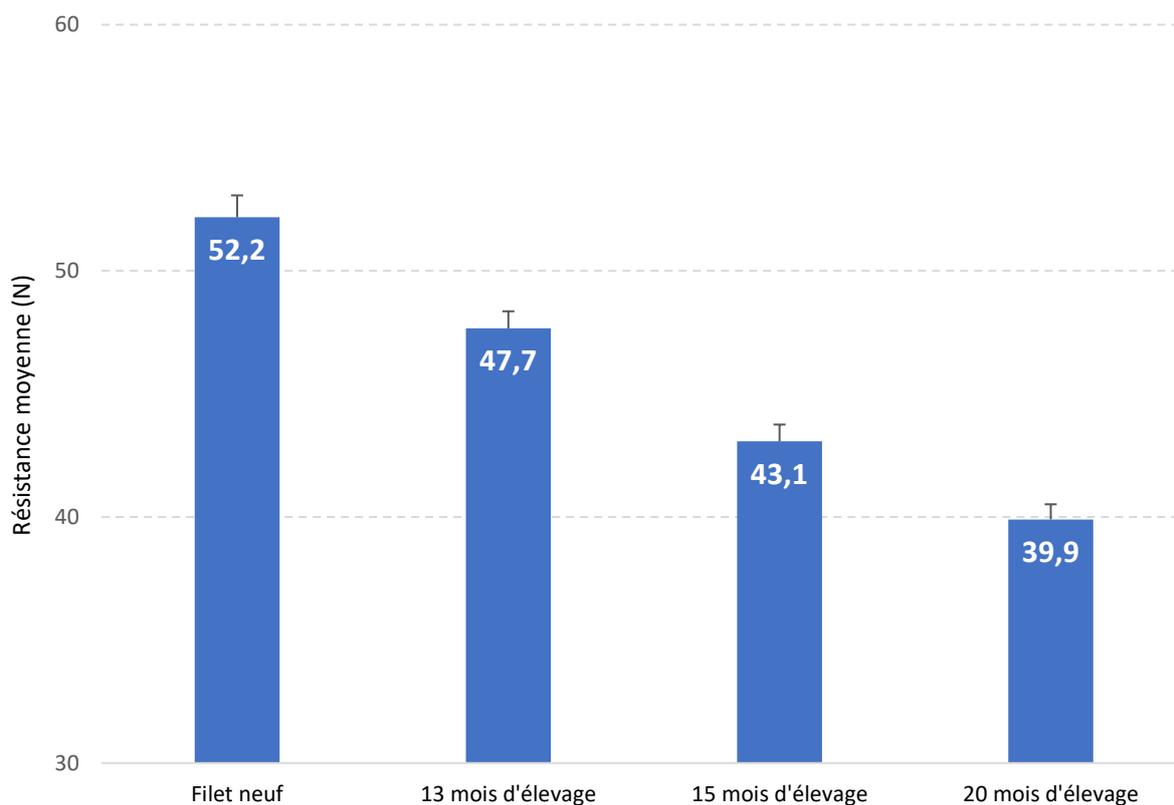


Figure 16 – Perte de résistance mécanique (N) des filets de catinage au cours d'un cycle d'élevage

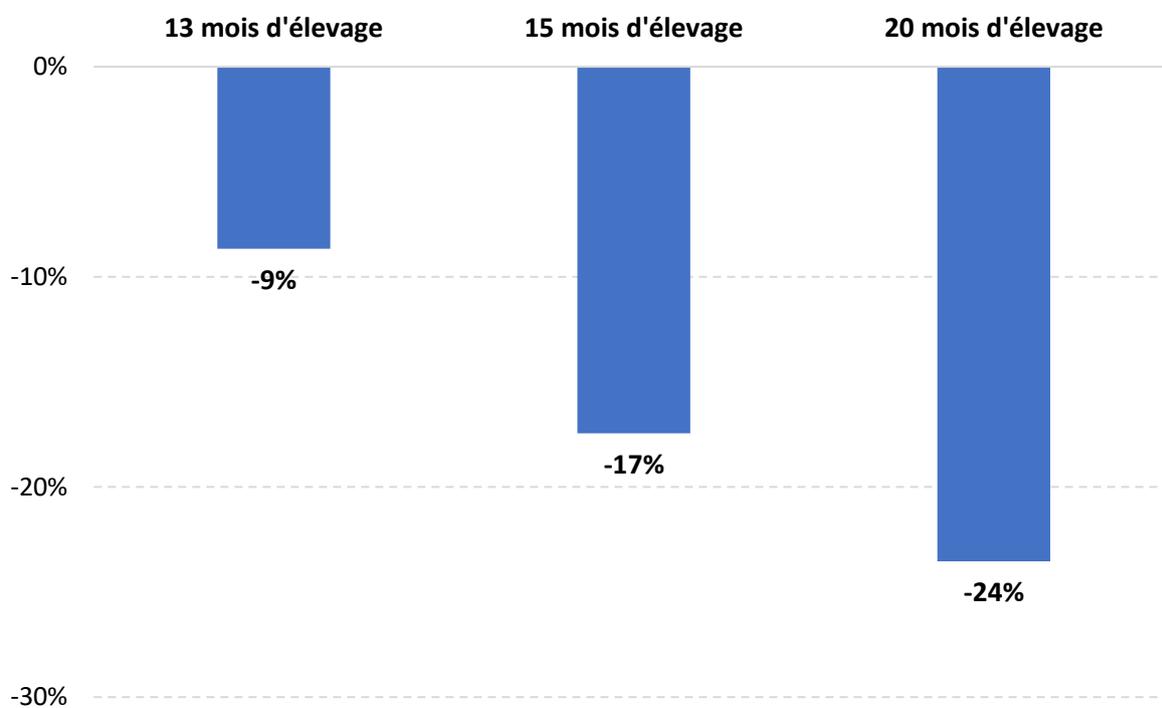


Figure 17 – Perte de résistance mécanique (%) des filets de catinage au cours d'un cycle d'élevage

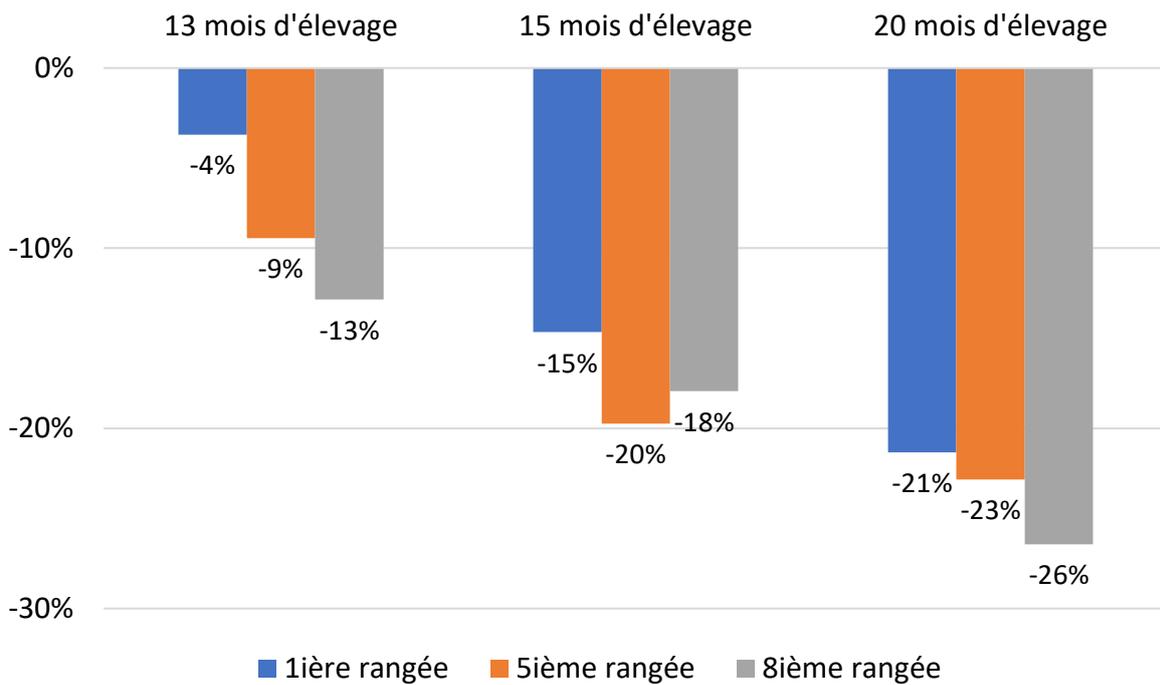


Figure 18 – Perte de résistance mécanique (%) des filets de catinage au cours d'un cycle d'élevage en fonction du niveau bathymétrique

Bibliographie

- (Ifremer), I. F. (s.d.). *Les déchets solides en mer et sur le littoral*. Récupéré sur notre-environnement.gouv.fr: <https://www.notre-environnement.gouv.fr/ree/rapport-sur-l-etat-de-l-environnement/themes-ree/milieux-et-territoires-a-enjeux/mer-et-littoral/etat-du-milieu-marin-et-littoral/article/les-dechets-solides-en-mer-et-sur-le-littoral>
- Arthur, C. J. (2009). *Proceedings of the International Research Workshop on the Occurrence, Effects, and Fate of Microplastic Marine Debris*. NOAA Marine Debris Program.
- Barnes, D., Galgani, F., Thompson, R., & Barlaz, M. (2009). *Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments*.
- Blin, J. L. (1996). *Sea urchin (Paracentrotus lividus) rearing in a closed circuit system*. Aquaculture Association Canada.
- Blin, J. L., Laisney, N., Lefebvre, V., Moal, S., Petinay, S., Cauvin, E., . . . Savary, M. (2020). *Microplast : Evaluation des microplastiques dans les produits conchylicoles normands*.
- Blin, J., & et al. (2022). *Gestion des biomasses mytilicoles*. SMEL.
- Bougis, P. (1967). *Utilisation des plutés en écologie expérimentale*. Station Zoologique, Villefranche-sur-mer.
- Butler, S., Freckleton, R., Renwick, A., & Norris, K. (2012). *An objective, niche-based approach to indicator species selection*. British Ecological Society - Methods in Ecology and Evolution.
- Carballeira C., Ramos-Gomez, J., Martin-Diaz, L., & DelValls, T. (2012). *Identification of specific malformations of sea urchin larvae for toxicity assesment : Application to marine pisciculture effluents*. Marine Environmental Reasearch, Volume 77, p12-22.
- Carli, S. (2021). *Développement d'une méthodologie pour l'évaluation et la maîtrise des impacts sanitaires et environnementaux des polymères destinés à un usage en mer : application à l'ostréiculture*. HESAM Université.
- Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., & Galloway, T. (2011). *Microplastics as contaminants in the marine environment : a review*.
- Deroine, M. (2014). *Etude du vieillissement de biopolymères en milieu marin*. Matériaux. Université de Bretagne Sud.
- Falugi, C., & Angelini, C. (2002). *Sea urchin development from the egg to metamorphosis : an integrated model for cell-to-cell and environment interaction*. DI.BI.SAA, University of Genova, Italy.
- Forbes, V., & Forbes, T. (1997). *Ecotoxicologie : théorie et applications*. INRA Editions.
- Gardon, T., Huvet, A., Paul-Pont, I., Cassone, A.-L., Sham Koua, M., Soyez, C., . . . Le Moullac, G. (2020). *Toxic effects of leachates from plastic pearl-farming gear on embryo-larval development in the pearl oyster Pinctada margaritifera*. Elsevier Ltd.
- Gontard, N., Bruzard, S., & Ghiglione, J.-F. (2019). *Les bioplastiques biodégradables et compostables*.
- Hégron, A. (2019). *Utilisation de la larve d'oursin Paracentrotus lividus pour tester la toxicité de matériaux plastiques issus de la pêche et de la conchyliculture*. SMEL / Université de Rennes 1.

- Hunt, E., & Bischoff, A. (1960). *Inimical effects on wildlife of periodic DDD applications to Clear Lake*. California Fish Game.
- Kershaw, P. (2015). *Biodegradable plastics and marine litter : Misconceptions, concerns and impacts on marine environments*. United Nations Environment Programme (UNEP).
- Kobayashi, N. (1971). *Fertilized sea urchin eggs as an indicatory material for marine pollution bioassay, preliminary experiments*. Kyoto University.
- Lithner, D., Nordensvan, I., & Göran, D. (2012). *Comparative Acute Toxicity of Leachates from Plastic Products Made of Polypropylene, Polyethylene, PVC, Acrylonitrile–Butadiene–Styrene, and Epoxy to Daphnia Magna*. Environmental Science and Pollution Research.
- Maheut, J. (2020). *BIOFILET : Evaluer des prototypes de filets mytilicoles biosourcés et compostables*. SMIDAP.
- Ramade, F. (1992). *Précis d'écotoxicologie*. Masson, Paris.
- Rendell-Bhatti, F., Paganos, P., & et al. (2020). *Developmental toxicity of plastic leachates on the sea urchin Paracentrotus lividus*. Science Direct, Elsevier.
- S. Pétinay et al., C. B. (2009). *Pétinay S., Chataigner C., Basuyaux O., 2009, Standardization of larval development of the sea urchin, Paracentrotus lividus, as tool for the assessment sea water quality. C. R. Biologies 332.*
- Volpi Ghirardini, A., Arizzi Novelli, A., Losso, C., & Ghetti, P. (2005). *Sperm cell and embryo toxicity tests using the sea urchins Paracentrotus lividus (Lmk)*. Techniques in Aquatic Toxicity, vol II, CRC Press, Danvers.
- Zimmermann, L., Göttlich, S., Oehlmann, J., Wagner, M., & Völker, C. (2020). *What are the drivers of microplastic toxicity ? Comparing the toxicity of plastics chemicals and particles to Daphnia magna*. Elsevier Ltd.

SMIDAP

Yolène Ledoux

3 rue Célestin Freinet, 44200 Nantes

Tel. : +33 (0)7 70 14 15 64

Email : yolene.ledoux@smidap.fr

RAPPORT D'ANALYSE

Caractérisation de la toxicité potentielle marine des alternatives aux filets de catinage extrudés et tricotés du SMIDAP dans le cadre du projet TOX REIPLIC sur la faune marine



Rapport N°RA-2024-033-001_V1
Date de rédaction : 15/02/2024
Date de dernière modification : 04/03/2024

SIEGE SOCIAL : 3 IMPASSE PABLO NERUDA, 66690 SAINT ANDRE, FRANCE

Société par actions simplifiées au Capital de 228 358 € – SIREN : 841 805 286 Plastic at Sea

Tel : +33 (04) 30 19 24 36 | Email : contact@plasticatsea.com | www.plasticatsea.com

Caractérisation de la toxicité potentielle marine des alternatives aux filets de catinage extrudés et tricotés du SMIDAP dans le cadre du projet TOX REIPLIC sur la faune marine

Par **Isabelle CALVES**
Responsable pôle toxicité

et **Anne-Leila MEISTERTZHEIM**
PDG, Plastic at Sea (Banyuls-sur-Mer)

©Copyright : 2024 Plastic at Sea

Caractérisation de la toxicité potentielle marine des alternatives aux filets de catinage extrudés et tricotés du SMIDAP dans le cadre du projet TOX REIPLIC sur la faune marine

CE DOCUMENT CONTIENT DES RENSEIGEMENTS EXCLUSIFS ET CONFIDENTIELS

Ce document est destiné à un usage strictement interne au sein du **SMIDAP** et contient des renseignements hautement confidentiels. Toute reproduction ou diffusion, même partielle, et toute utilisation en dehors de **SMIDAP** sont strictement interdites.

THIS DOCUMENT CONTAINS SECRET PROPRIETARY INFORMATION

This document is intended strictly for internal use within **SMIDAP** and contains highly confidential information. Any reproduction or distribution, even partial, and any use outside **SMIDAP** are strictly forbidden.

Table des matières

Liste des Figures	ii
Liste des Tableaux	iii
Liste des Annexes	iv
Liste des Acronymes	v
1. Rappel du contexte et des objectifs du projet.....	1
2. Matériaux testés	2
3. Design expérimental, Matériels et Méthodes	3
3.1. Contexte expérimental	3
3.2. Design expérimental.....	4
3.2.1. Dispositif expérimental.....	4
3.2.2. Concentrations d'essai.....	5
3.2.3. Matériel biologique	5
3.2.4. Principes des différentes analyses réalisées :	6
a. Taux de croissance des coquilles de moules exposés dans les différentes conditions.....	6
a. Bioaccumulation des différents types de plastiques dans les tissus de moule par microscopie	7
b. Réserves Énergétiques : les lipides totaux.....	7
c. Réserves Énergétiques : les protéines totales (non inclus dans le devis).....	8
d. Protéines de stress : HSP 70 (non inclus dans le devis)	9
4. Résultats du test de toxicité Chronique en condition marine	11
4.1. Bioaccumulation des types de plastiques dans les tissus	11
4.2. Réserves énergétiques : les lipides totaux.....	12
4.3. Réserves énergétiques : les protéines totales	12
4.4. Protéines de stress : HSP70 (Hors devis).....	13
4.5. Taux de croissance des coquilles	11
5. Discussion & Conclusion générale	14
6. Annexes	17

Liste des Figures

Figure 1 : Échantillons réceptionnés correspondant aux différents types de filet	2
Figure 2 : Schéma du dispositif expérimental optimisant la bioaccessibilité des plastiques pour le test de toxicité chronique (100 jours) sur la moule (<i>M. galloprovincialis</i>).	4
Figure 3 : Dispersion des particules de matière broyée dans le bac de rétention (50 L), exemple de la cellulose	5
Figure 4 : Photos représentant l'inclusion des coquilles dans la résine (A), les découpes le long de l'axe maximal de croissance (B), le polissage des lames minces (C), et la révélation du marquage par microscope à épifluorescence (D).....	6
Figure 4 : A) Digestats de moules, B) leurs filtrations sur filtres en polycarbonate à porosité de $3\mu\text{m}$, et C) le marquage au Nile Red.....	7
Figure 5 : Photos représentant l'extraction (A) et l'isolation (B) des lipides totaux à partir des tissus, la transformation des lipides en ions carbonium (C), et la réaction à la vallinine (D) pour une mesure d'absorbance en fonction de la gamme étalon (E).....	8
Figure 6 : Photos représentant l'extraction et la centrifugation pour récupération des protéines totales (A), puis les ajouts des réactifs (B), pour formation d'un complexe bleu dont l'absorbance est mesurée en fonction de la gamme étalon (C).....	9
Figure 7 : Photos représentant (A) la séparation des protéines par électrophorèse, (B) le transfert sur membrane avant révélation par immunodétection (C).....	10
Figure 9 : Photographie faites au microscope à épifluorescence mettant en évidence la présence de particules plastiques dans les différentes conditions après 100 jours d'expositions. A. contrôle (cellulose), filet de catinage extrudé conventionnel INTERMAS (Cat-ex-conv), B. Boudin de naissains tricoté coton + PP (Boud-Tri-Conv), C. Boudin de naissains tricoté PLA + PP (Boud-tri-Bio), D. filet de catinage Extrudé SEA212 de Seabird (Cat-ex-bio)	11
Figure 10 : Quantité de lipides totaux (mg d'équivalent cholestérol par g de moule lyophilisée et broyée) après 100 jours d'exposition aux conditions contrôle (cellulose), filet de catinage extrudé conventionnel INTERMAS (Cat-ex-conv), Boudin de naissains tricoté coton + PP (Boud-Tri-Conv), Boudin de naissains tricoté PLA + PP (Boud-tri-Bio), filet de catinage Extrudé SEA212 de Seabird (Cat-ex-bio)	12
Figure 11 : Quantité de protéines totales (mg d'équivalent BSA par g de moule lyophilisée et broyée) après 100 jours d'exposition aux conditions contrôle (cellulose), filet de catinage extrudé conventionnel INTERMAS (Cat-ex-conv), Boudin de naissains tricoté coton + PP (Boud-Tri-Conv), Boudin de naissains tricoté PLA + PP (Boud-tri-Bio), filet de catinage Extrudé SEA212 de Seabird (Cat-ex-bio)	13
Figure 14 : Croissance des coquilles de moules après 100 jours d'exposition aux conditions contrôle (cellulose), filet de catinage extrudé conventionnel INTERMAS (Cat-ex-conv), Boudin de naissains tricoté coton + PP (Boud-Tri-Conv), Boudin de naissains tricoté PLA + PP (Boud-tri-Bio), filet de catinage Extrudé SEA212 de Seabird (Cat-ex-bio)	11

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Diagramme de Gantt des tâches du projet réparties sur 2023-2024. 1

Liste des Annexes

Annexe 1 : Spectre FTIR de l'échantillon de filet de catinage SEA 212 (cat-ex-bio).....	17
Annexe 2 : Spectre FTIR de l'échantillon de filet de catinage extrudé conventionnel INTERMAS (Cat-ex-conv) ..	17

Liste des Acronymes

Acronymes des institutions

SMIDAP	Syndicat Mixte pour le Développement de l'aquaculture et la pêche
---------------	---

PAS	Plastic At Sea
------------	----------------

Acronymes scientifiques et techniques

PP	Polypropylène
-----------	---------------

PE	Polyéthylène
-----------	--------------

PLA	Acide polylactique
------------	--------------------

1. Rappel du contexte et des objectifs du projet

La société Plastic At Sea a une expertise reconnue internationalement dans l'évaluation des niveaux de pollution plastique dans l'environnement, de leurs impacts sur plusieurs espèces sentinelles représentatives des écosystèmes marins, et sur la fin de vie des produits.

A ce titre, la société Plastic At Sea a été consultée par le Syndicat Mixte pour le Développement de l'Aquaculture et de la Pêche dans les pays de la Loire (SMIDAP) afin d'évaluer la toxicité potentielle de différentes matières, entrant dans la confection de filets de catinage et de filets à boudin de naissains utilisés en conchyliculture, sur la faune marine. Ici, l'objectif de la présente étude était de tester l'effet toxique de filets de catinage en Seabird SEA212 (Annexe 1) (et/ou en acide poly lactique PLA tricoté) pouvant être utilisés comme alternatives aux filets conventionnels. L'opération de catinage est couramment pratiquée par les mytiliculteurs pour parer au risque de décrochage des moules d'élevage fixées sur leur bouchot, dû aux effets de la houle et des marées. Elle consiste à enfiler sur le pieu garni de moules une "chaussette" de filet classiquement en matière plastique.

Afin d'estimer les effets potentiels des filets de catinage à long terme sur la biodiversité marine, l'étude des effets chroniques a été privilégiée pour être au plus proche des conditions naturelles, étant donné que les moules sont mises en culture sur plusieurs dizaines de mois. Pour ce faire, un test de toxicité chronique exposant des moules marines à des particules micronisées issues des différents types de filet a été réalisé durant 100 jours.

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet REIPLIC portant sur la réduction des impacts plastiques en conchyliculture dont est porteur le SMIDAP.

Tableau 1 : Diagramme de Gantt des tâches du projet réparties sur 2023-2024.

MOIS	2023					2024	
	8	9	10	11	12	1	2
Action 2 : Test de toxicité							
<i>Toxicité chronique</i>							
Acclimatation							
Exposition							
Analyses physiologiques							
Action 3 : Suivi de l'opération							
Réunion de suivi de l'étude							
Rapports intermédiaires et finaux							L1

Livrables

L3 : Réunion de restitution des résultats et rendu du rapport d'analyse

2. Matériaux testés



Figure 1 : Échantillons réceptionnés correspondant aux différents types de filet A. filet de catinage extrudé conventionnel INTERMAS (Cat-ex-conv), B. Boudin de naissains tricoté coton + PP (Boud-Tri-Conv), C. Boudin de naissains tricoté PLA + PP (Boud-tri-Bio), D. filet de catinage tricoté PLA (Cat-Tri-bio), E. filet de catinage Extrudé SEA212 de Seabird (Cat-ex-bio),

La société Plastic At Sea a réceptionné 5 échantillons de filets le 23/06/2023 :

- ◇ Catinage extrudé conventionnel INTERMAS (Cat-ex-conv)
- ◇ Boudin de naissains tricoté coton + polypropylène PP (Boud-Tri-Conv)
- ◇ Boudin de naissains tricoté acide poly lactique PLA + polypropylène PP (Boud-tri-Bio)
- ◇ Catinage extrudé SEA212 de Seabird (Cat-ex-bio)
- ◇ Catinage tricoté PLA (Cat-Tri-bio), *non étudié ici*

Le devis n°23-DE051 signé le 15/06/2023, ne faisait état que de l'étude de 4 matières en comparaison à un contrôle négatif, la cellulose grade 42. L'échantillon correspondant au filet de catinage tricoté 100% PLA (Cat-Tri-bio) a été retiré de l'étude à la demande de Madame Ledoux et après concertation entre les différents partenaires du projet en date du 17/07/2023.

En conséquence, seuls les échantillons suivants ont été testés : un filet de catinage extrudé conventionnel INTERMAS (Cat-ex-conv), un boudin de naissains tricoté coton + PP (Boud-Tri-Conv), un boudin de naissains tricoté PLA + PP (Boud-tri-Bio) et un filet de catinage Extrudé SEA212 de Seabird (Cat-ex-bio)

A noter qu'à la demande de Madame Le doux, une analyse par spectrométrie infrarouge a transformée de Fourier (ATR-FTIR) a été réalisée afin de valider la nature du polymère utilisé dans la confection du filet de catinage extrudé conventionnel (Cat-ex-conv), à savoir, identifié dans le cadre de cette étude comme étant du polyéthylène (PE). Le résultat de l'analyse est disponible en Annexe 2 du présent rapport.

3. Design expérimental, Matériels et Méthodes

3.1. Contexte expérimental

L'étude de la toxicité chronique permet d'identifier les effets long terme pouvant se manifester chez un organisme exposé à une substance. La concentration d'essai est représentative de celles retrouvées dans l'environnement (actuelles et futures), et pouvant entraîner des altérations biologiques non détectables par un test aiguë.

La moule commune, du genre *Mytilus*, a été choisie dans le cadre de cette étude, car est déjà utilisée comme espèce sentinelle dans l'étude de contamination chimique en milieu côtier dans différents réseaux de surveillance, notamment en France sous le terme générique « Mussel Watch »^{1,2}. Les réseaux ROCCH (Réseau d'Observation de la Contamination CHimique) ou RINBIO (Le Réseau INTégrateurs BIOlogiques) utilisent également la moule comme bioindicateur de différents polluants chimiques (métaux, HAPs, dioxines, PCB, etc.) sur le littoral français depuis 1979. Ils permettent de répondre aux obligations nationales, communautaires et internationales de surveillance chimique : application de la DCE (Directive Cadre sur l'Eau), DCSMM (Directive Cadre Stratégie sur le Milieu Marin) et conventions OSPAR (OSlo- PARis et de Barcelone). Les moules sont des organismes filtreurs, peu sélectifs, capables d'ingérer des particules d'une taille comprise entre 4 et 100 µm. Ces bivalves présentent des caractéristiques qui en font de bons bioindicateurs en raison de : leur large répartition géographique allant des régions tempérées aux régions subarctiques ; leur mode de vie sessile et euryhalin ; la stabilité de leur population ; leur tolérance à différents stress ; ou encore leur consommation par l'homme faisant d'elles un maillon de notre chaîne alimentaire.

De récentes études de terrain ont démontré la capacité des moules (provenant de plus de vingt pays) à bioaccumuler les microplastiques dans leurs tissus³. De même, plusieurs publications ont démontré la présence de particules de cellulose dans les tissus des moules^{4,5,6}. Cette dernière matière est utilisée comme contrôle négatif dans le cadre de ce test car une absence d'effet a été observé sur la physiologie de la moule à long terme. (Wolinski et al., in prep).

¹ Golberg (1975), The mussel watch-a first step in global marine monitoring.

² Claisse & Simon (1989), Le 'Mussel-Watch' français : résultats acquis sur les moules et les huîtres du littoral de la France.

³ Li (2021) Where are we? Towards an understanding of the selective accumulation of microplastics in mussels.

⁴ Spark (2021) Abundance and characteristics of microplastics in retail mussels from Cape Town, South Africa.

⁵ Li (2018) Microplastics in mussels sampled from coastal waters and supermarkets in the United Kingdom.

⁶ Scott (2019) Particle characteristics of microplastics contaminating the mussel *Mytilus edulis* and their surrounding environments.

3.2. Design expérimental

3.2.1. Dispositif expérimental

Le test de toxicité chronique proposé dans le cadre de cette étude s'appuie sur l'expertise de la société Plastic At Sea. Celle-ci a en effet développé un système d'aquarium breveté permettant de réaliser des tests d'exposition durant une longue période, à différents types de contaminants incluant les matières solides ayant une forte flottabilité. Dans ces aquariums, appelés PlastiCell©, les microparticules sont rendues accessibles aux moules marines (*Mytilus galloprovincialis*). Le dispositif expérimental se compose de 5 systèmes d'aquariologie semi-fermés composés chacun de 8 PlastiCell© (**Figure 2**), chaque système correspond à une condition expérimentale.

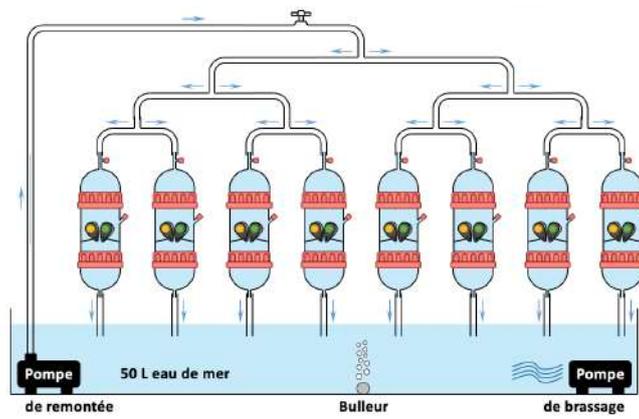


Figure 2 : Schéma du dispositif expérimental optimisant la bioaccessibilité des plastiques pour le test de toxicité chronique (100 jours) sur la moule (*M. galloprovincialis*).

Ici, cinq conditions expérimentales ont été testées :

- (1) la condition contrôle négatif (cellulose grade 42),
- (2) filet à boudin de naissains tricoté PLA (Boud-tri-Bio),
- (3) filet à boudin de naissains tricotés coton + PP (Boud-Tri-Conv)
- (4) filet de catinage extrudé SEA212 (Cat-ex-bio),
- (5) filet de catinage extrudé conventionnel (Cat-ex-conv)

Les aquariums ont été alimentés de manière continue (200 mL/min) en eau de mer filtrée (1-3 μm) à partir d'un bac de rétention de 50 L avec un système de recirculation permettant d'optimiser l'exposition des moules aux particules. L'eau de chaque bac de rétention a été renouvelée 2 fois par semaine avec de l'eau de mer filtrée à 1-3 μm prélevée au large de la Baie de Banyuls-sur-Mer à 14 m de profondeur. Les apports nutritifs ont été apportés aux moules via l'ajout continu de phytoplanctons ($400 \cdot 10^7$ cellules/jour) issus de cultures fraîches de *Chaetoceros* sp., *Isochrysis* sp. et de *Tetraselmis* sp. Les paramètres physicochimiques de l'eau (température, salinité, NO_2 , NO_3 , NH_4) ont été suivis chaque semaine afin d'assurer une qualité d'eau optimale durant toute la

durée de l'expérimentation (100 jours). Enfin, un dispositif lumineux à LED, a été positionné au-dessus de chaque système pour assurer un éclairage adapté (29 watts) suivant un rythme jour/nuit (12H/12H).

3.2.2. Concentrations d'essai

Ici, 20 g de chaque matière ont été micronisés à l'aide d'un broyeur d'analyse IKA A11 puis tamisées à 500 μ m. Pour chaque matière, les particules d'une taille inférieure à 500 μ m ont été déposée dans un tube en verre auquel a été ajouté 20mL l'éthanol pur. La solution a été ensuite laissée à décanter pendant 30 minutes et le surnageant, contenant les plus petites particules, a été récupéré. Les particules ont été dénombré et mesurées à l'aide du logiciel d'imageJ. Le surnageant a ensuite été dilué pour obtenir une concentration de l'ordre de **1000 particules / L** d'une taille comprise entre 4 et 25 μ m.

Les moules ont été exposées à 5 fois la dose environnementale (200 particules/ L)⁷ au cours des 100 jours expérimentation afin de maximiser les effets potentiels des différentes matières sur les organismes marins.

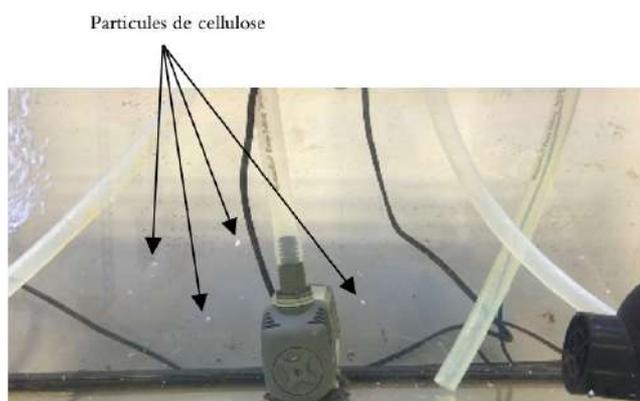


Figure 3 : Dispersion des particules de matière broyée dans le bac de rétention (50 L), exemple de la cellulose. Crédit photo Plastic At Sea

3.2.3. Matériel biologique

Des moules (*Mytilus galloprovincialis*) de $4 \pm 0,5$ cm ont été collectées en baie de Banyuls-sur-Mer (42.481962, 3.133110) le 17/08/2023 et placées en acclimatation au laboratoire pendant 8 jours en amont du lancement de l'expérimentation. Au lancement de l'expérimentation, ces moules ont été exposées 1 heure à un composé fluorescent non toxique permettant de marquer les coquilles pour suivre leur croissance (Cf 3.2.4a). A la suite de cela, elles ont été réparties aléatoirement dans les différentes PlastiCell©, à raison de 2 moules par PlastiCell©, soit 16 moules par condition expérimentale.

Après 100 jours d'expérimentation, 8 moules de chaque condition expérimentale ont été disséquées. Les coquilles ont été séparées des tissus mous et conservées pour le suivi du taux de croissance des moules. Pour les tissus mous, un pool de 3 moules lyophilisées a été utilisée pour mettre en évidence la bioaccumulation (Cf

⁷ Song et al (2014) Large accumulation of micro-sized synthetic polymer particles in the sea surface microlayer

3.2.4b). Les tissus mous lyophilisés des autres moules ont permis d'analyser les indices physiologiques de l'état de santé de l'organisme après broyage à billes par TissueLyser II (Cf 3.2.4c).

A noter que les moules étaient hors reproduction tout au long de l'expérimentation par analyse visuel de la gonade.

3.2.4. Principes des différentes analyses réalisées :

a. Taux de croissance des coquilles de moules exposés dans les différentes conditions

La croissance des coquilles de moules s'étudie via une approche de sclérochronologie. Au début de l'expérimentation, les moules ont été incubées dans un bain contenant un composé non-toxique fluorescent, la calcéine (150 mg.L⁻¹, 1h). La calcéine a été intégrée au niveau de l'extrémité des coquilles de façon permanente, et délimite leurs tailles initiales⁸. A la fin de l'expérimentation (100 jours), ces coquilles ont été séparées des tissus, incluses dans une résine (Sody 33, Escil), puis découpées à deux reprises à la scie diamant (Buehler Isomet) pour obtenir des lames minces (**Figure 4**). Ces lames ont finalement été observées au microscope à épifluorescence à 495 nm (Olympus IX51) pour révéler le marquage à la calcéine (taille initiale) et l'extrémité de la coquille (taille finale). Ainsi, la distance entre ces points représente la croissance de la coquille sur 100 jours d'exposition (**Figure 4**).

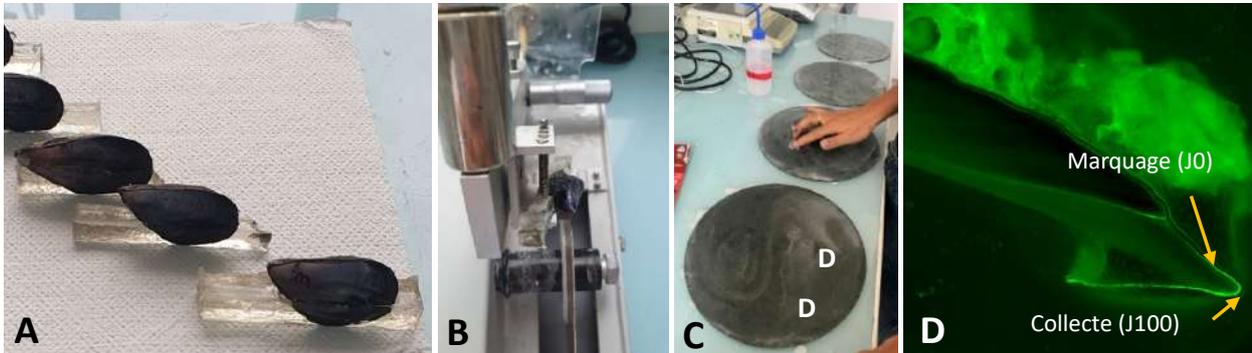


Figure 4 : Photos représentant l'inclusion des coquilles dans la résine (A), les découpes le long de l'axe maximal de croissance (B), le polissage des lames minces (C), et la révélation du marquage par microscope à épifluorescence (D).

⁸ Moran 2000. Calcein as a marker in experimental studies newly hatched gastropods.

a. Bioaccumulation des différents types de plastiques dans les tissus de moule par microscopie

Afin de confirmer la présence de microparticules des différentes matières testées dans les tissus des moules, leur bioaccumulation a été vérifiée après 100 jours d'expérimentation.

A partir de moules lyophilisées, une digestion chimique par condition (1 pool de 3 moules par condition) a été réalisée au KOH 10 % pendant 24 h. Les digestats ont ensuite été filtrés en triplicat sur filtre polycarbonate (47mm) à une porosité de 3 μm (**Figure 5**).

La détection des microparticules de cellulose a été réalisée par coloration au Rouge Congo (100 $\mu\text{g}/\text{mL}$) tandis que la détection des autres types de particules plastique a été réalisée à l'aide du colorant fluorescent Nile red (100 $\mu\text{g}/\text{mL}$).

Pour la cellulose, les filtres ont été placés dans un bain d'eau de javel afin de vider tout contenu cellulaire, rincés à l'eau distillée, puis placés dans un bain d'acide acétique afin de faciliter la fixation du colorant Rouge Congo, puis rincés avant séchage pour l'observation au microscope optique.

Pour les autres matières plastiques, les filtres ont été placés 1h dans un bain d'éthanol au Nile Red avant filtration secondaires et rinçage à l'éthanol. Au microscope à épifluorescence, les filtres ont été excités à une longueur d'onde de 470nm avant observation sous filtre jaune afin de mettre en évidence les particules de plastiques.



Figure 5 : A) Digestats de moules, B) leurs filtrations sur filtres en polycarbonate à porosité de 3 μm , et C) le marquage au Nile Red.

b. Réserves Énergétiques : les lipides totaux

La quantité de lipides totaux est déterminée par un dosage colorimétrique basé sur la réaction sulfophovanillique selon la méthode de Barnes and Blackstock (1973)⁹. Cette méthode repose sur (i) l'extraction des lipides des tissus, (ii) leurs transformations en ions carbonium grâce à l'action d'un acide concentré et (iii) leurs dosages via une réaction avec la vanilline (**Figure 6**).

Pour l'extraction (i), 1,5 mL de mélange chloroforme/méthanol (2:1) ont été ajoutés à 10 mg de tissus de moule lyophilisée et broyée (duplicat de tissus). Après agitation orbitale de 20 minutes, les échantillons ont été

⁹ Barnes and Blackstock (1973) Estimation of lipids in marine animals and tissues.

centrifugés à 2000 rpm pendant 10 min à 4°C afin de dissocier les lipides solubilisés du reste des tissus. De cet échantillon, 1 mL de surnageant (contenant les lipides et le solvant) a été récupéré dans un nouveau tube pour évaporation totale sous sorbonne à 90°C. Les lipides (partie sèche) ont ensuite été transformés en ions carbonium (ii), par l'ajout de 500 µL d'acide sulfurique, le tout chauffé 10 minutes à 90°C. Pour le dosage (iii), 100 µL de ces ions carbonium ont été ajoutés à 2,5 mL de réactif phosphovanillique, puis placés 30 minutes à l'obscurité pour stabiliser la coloration dont l'absorbance se mesure à 520 nm (duplicat de mesure) à l'aide d'un spectrophotomètre (Shiwadzu UV-1605). Les concentrations en lipides sont calculées à partir d'une courbe d'étalonnage réalisée avec des concentrations croissantes (0, 0.04, 0.08, 0.16, 0.32, 0.48, 0.64, et 0.96 µg.µL⁻¹) d'une solution stock de cholestérol (sigma, ref : FI-10216983) et sont exprimées en mg d'équivalent cholestérol par gramme de moule.

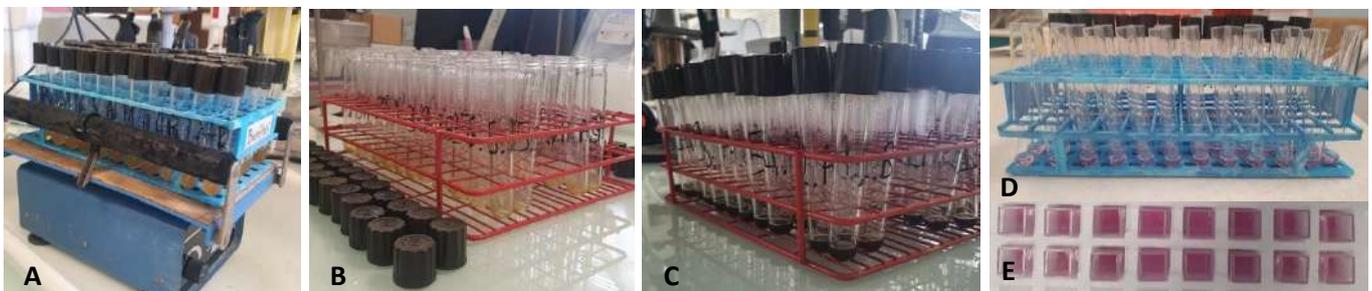


Figure 6 : Photos représentant l'extraction (A) et l'isolation (B) des lipides totaux à partir des tissus, la transformation des lipides en ions carbonium (C), et la réaction à la vallinine (D) pour une mesure d'absorbance en fonction de la gamme étalon (E).

c. Réserves Énergétiques : les protéines totales (non inclus dans le devis)

Les protéines totales ont été dosées par la méthode de Lowry (1951)¹⁰, via le kit « Bio-Rad DC Protein Assay ». Cette méthode repose sur (i) l'extraction des protéines des tissus, et (ii) la formation du complexe entre le bleu de Coomassie et certains acides aminés (basiques et hydrophobes) présents dans les protéines conduisant à une coloration bleue (**Figure 7**).

Pour l'extraction (i), 500 µL de tampon d'extraction PMSF (fluorure de phénylméthylsulfonyle, inhibiteur de protéase) ont été ajoutés à 10 mg de tissus de moule lyophilisée et broyée (duplicat de tissus). Après agitation, les échantillons ont été centrifugés à 12000 rpm pendant 10 min à 4°C afin de dissocier les protéines solubilisées du reste des tissus. De cet échantillon, 30 µL de surnageant (contenant les protéines et le tampon) a été récupéré et dilué avec 150 µL de tampon d'extraction PMSF. De cet échantillon dilué, 5 µL ont été récupérés en triplicat et déposés dans un puit de plaque 96 puits. Pour le dosage (ii), 25 µL de solution de tartrate de cuivre alcaline (réactif A), puis 200 µL de solution de Folin (réactif B) ont été ajoutés à chaque puit pour réaction avec les protéines présentes. Cette réaction entraîne la réduction des acides aminés aromatiques

¹⁰ Lowry et al. 1951. Protein measurement with folin phenol reagent.

conduisant à la formation d'un complexe coloré bleu (15 minutes à l'obscurité) dont l'absorbance se mesure à 685 nm à l'aide d'un spectrophotomètre (Victor Nivo). Les concentrations en protéines sont calculées à partir d'une courbe d'étalonnage réalisée avec des gammes de concentrations croissantes (0, 0.4, 0.6, 0.75, 1, et 1.5 $\mu\text{g}\cdot\mu\text{L}^{-1}$) d'une solution stock de sérum d'albumine bovin (BSA, SIGMA référence A-7030) et sont exprimées en mg d'équivalent BSA par gramme de moule.

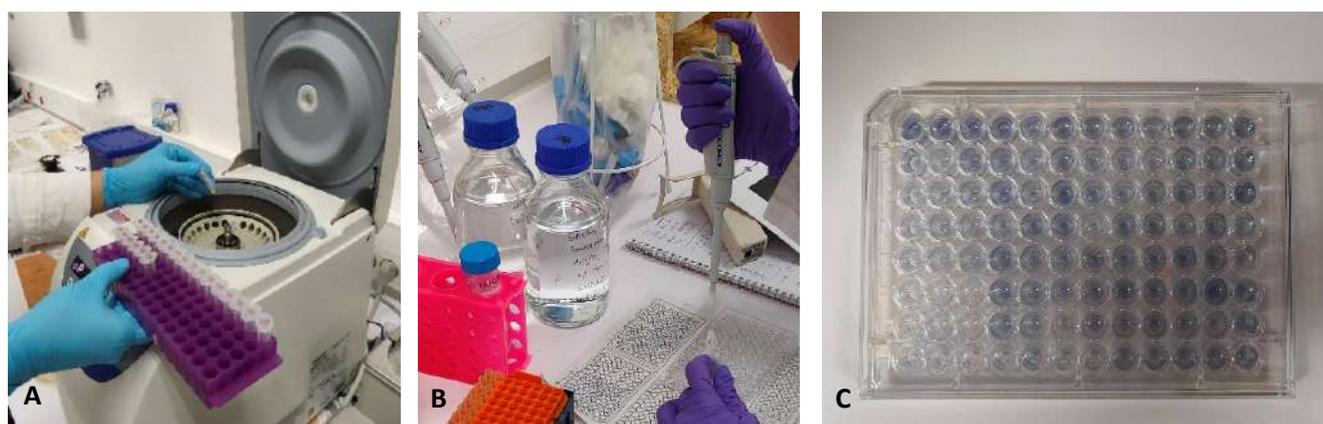


Figure 7 : Photos représentant l'extraction et la centrifugation pour récupération des protéines totales (A), puis les ajouts des réactifs (B), pour formation d'un complexe bleu dont l'absorbance est mesurée en fonction de la gamme étalon (C).

d. Protéines de stress : HSP 70 (non inclus dans le devis)

En présence d'un stress, une des adaptations biologiques est la synthèse de protéines de stress dites « chaperonnes »¹¹. Les chaperonnes empêchent les protéines de se dénaturer et facilitent la renaturation des protéines endommagées ou leur élimination via protéolyse en cas de dommages irréversibles^{12,13}. Ce sont des protéines très conservées au cours de l'évolution^{14,15}.

Les protéines HSP70 (Heat Shock Protein) sont un groupe de protéines chaperonnes de 70 KDa jouant un rôle essentiel à la vie cellulaire¹⁶ mais également dans les processus de protection cellulaire lors d'un stress. L'induction de leur production a été mesurée chez différents invertébrés marins en réponse à des stress : thermique positif^{17,18}, exposition à des contaminants¹⁹, à une hypoxie²⁰, aux radiations²¹ et aux infections²².

¹¹ Feder & Hofmann (1999) Heat-shock proteins, molecular chaperones, and the stress response: evolutionary and ecological physiology

¹² Parsell & Lindquist (1993) The function of heat-shock proteins in stress tolerance: degradation and reactivation of damaged proteins

¹³ Airaksinen (2003) Heat- and cold-inducible regulation of HSP70 expression in zebrafish ZF4 cells.

¹⁴ Schlesinger (1982) The response of cells to heat shock.

¹⁵ Lindquist (1986) The heat-shock response

¹⁶ Feder & Hofmann (1999) Heat-shock proteins, molecular chaperones, and the stress response: evolutionary and ecological physiology

¹⁷ Lindquist & Craig (1988) The Heat-Shock Proteins.

¹⁸ Meistertzheim (2007) Identification of differentially expressed genes of the Pacific oyster *Crassostrea gigas* exposed to prolonged thermal stress.

¹⁹ Boutet (2004) Response of the Pacific oyster *Crassostrea gigas* to hydrocarbon contamination under experimental conditions.

²⁰ David (2005) Response of the Pacific oyster *Crassostrea gigas* to hypoxia exposure under experimental conditions.

²¹ Farcy (2011) Effect of Ionizing Radiation on the Transcription Levels of Cell Stress Marker Genes in the Pacific Oyster *Crassostrea gigas*.

²² Deane (2004) Modulated heat shock protein expression during pathogenic *Vibrio alginolyticus* stress of sea bream.

Le méthode d'immunodétection du Western Blot a été utilisée dans notre étude afin de détecter ces protéines, à l'aide d'un anticorps anti-HSP70 validé chez la moule *M. galloprovincialis*, (**Figure 8**). Dans un premier temps, les protéines totales extraites (Cf. 3.2.4.c) ainsi qu'un marqueur témoin de poids moléculaires ont été incubés dans un gel d'électrophorèse pour séparation des protéines d'intérêts. Le principe s'appuie sur le fait que les protéines chargées négativement migrent par induction électrique plus ou moins loin dans le gel en fonction de leur poids moléculaire et de leur point de focalisation isoélectrique. Les protéines ont ensuite été transférées sur membrane pour sondage avec un anticorps primaire spécifique aux HSP70. Après lavage, des anticorps secondaires (qui reconnaissent l'anticorps primaire) ont été ajoutés. Finalement, un substrat colorimétrique réagissant avec le complexe enzymatique de l'anticorps secondaire est ajouté pour former une coloration bleu foncé. Les bandes formées représentent les concentrations des protéines HSP70 validé par leur poids moléculaire.

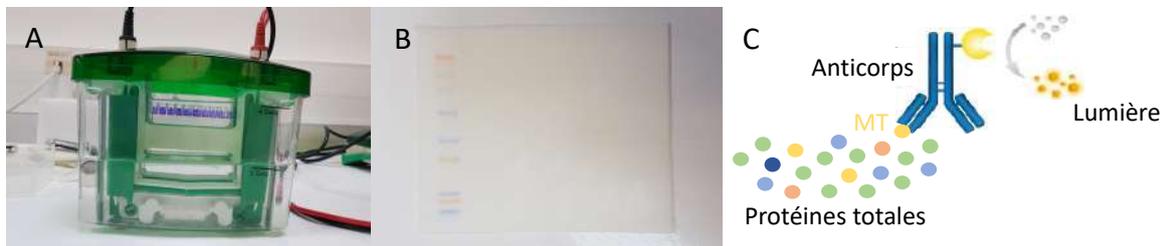


Figure 8 : Photos représentant (A) la séparation des protéines par électrophorèse, (B) le transfert sur membrane avant révélation par immunodétection (C).

e. Analyses statistiques :

La normalité des différents jeux de données a été testé à l'aide d'un test de Kolmogorov-Smirnov (Massey, 1951) suivi d'un test de Lilliefors (1967) permettant de tester l'homogénéité des variances. Pour les variables de lipides totaux et de protéines totales suivant une loi normale, un test paramétrique (Anova, test LSD) a été appliqué. Pour la variable de croissance, un test non paramétrique de Kruskal-Wallis et test de la médiane ont été appliqués.

4. Résultats du test de toxicité Chronique en condition marine

4.1. Taux de croissance des coquilles

La croissance des coquilles ne diffère pas significativement (K-W test, N=5, $p > 0,05$) entre les moules exposées aux conditions Contrôle et les différentes matières testées sur 100 jours d'exposition (**Figure 9**).

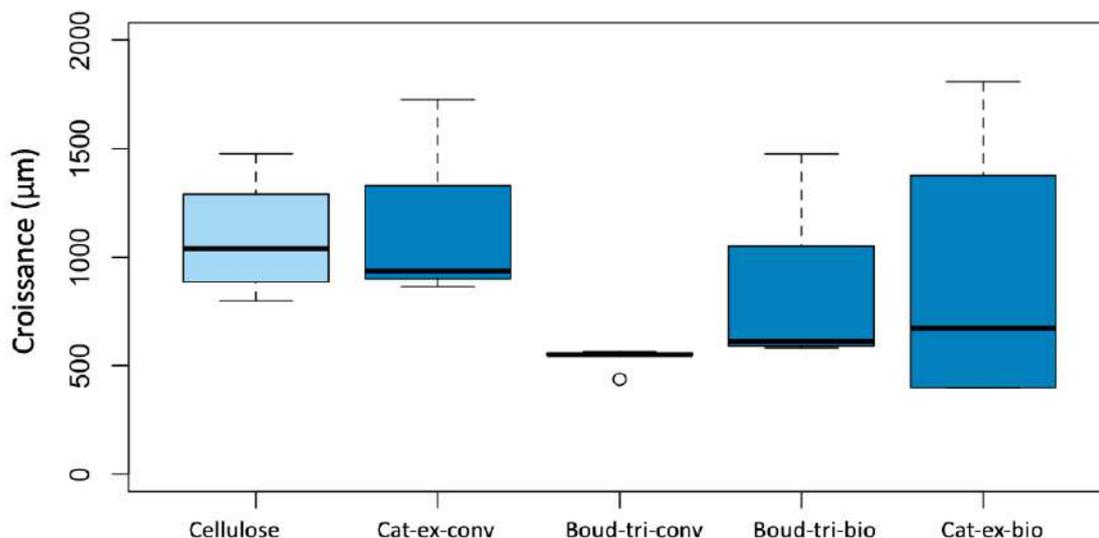


Figure 9 : Croissance des coquilles de moules après 100 jours d'exposition aux conditions contrôle (cellulose), filet de catinage extrudé conventionnel INTERMAS (Cat-ex-conv), Boudin de naissains tricoté coton + PP (Boud-Tri-Conv), Boudin de naissains tricoté PLA + PP (Boud-tri-Bio), filet de catinage Extrudé SEA212 de Seabird (Cat-ex-bio), les barres verticales représentent l'écart-type.

4.2. Bioaccumulation des types de plastiques dans les tissus

Les marquages au Rouge Congo et au Nile Red mettent en évidence la bioaccumulation des particules dans les tissus de moules (**Figure 10**), validant l'exposition des moules aux différentes matières.

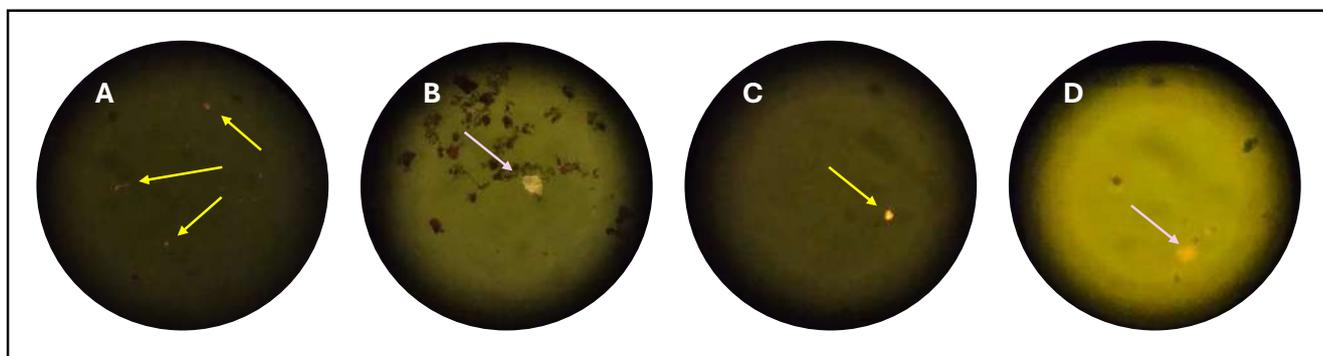


Figure 10 : Photographie faites au microscope à épifluorescence mettant en évidence la présence de particules plastiques (entre 4 et 25 μm) dans les différentes conditions après 100 jours d'expositions. A. contrôle (cellulose), B. filet de catinage extrudé conventionnel INTERMAS (Cat-ex-conv), C. Boudin de naissains tricoté coton + PP (Boud-Tri-Conv), D. Boudin de naissains tricoté PLA + PP (Boud-tri-Bio), E. filet de catinage Extrudé SEA212 de Seabird (Cat-ex-bio)

4.3. Réserves énergétiques : les lipides totaux

La quantité de lipides totaux (en équivalent cholestérol) ne diffère pas significativement (Anova et test LSD, N=5, p>0,05) entre les moules exposées aux conditions contrôle et les différentes matières testées sur 100 jours (Figure 11) à l'exception de la condition Boud-tri-bio (PLA+PP).

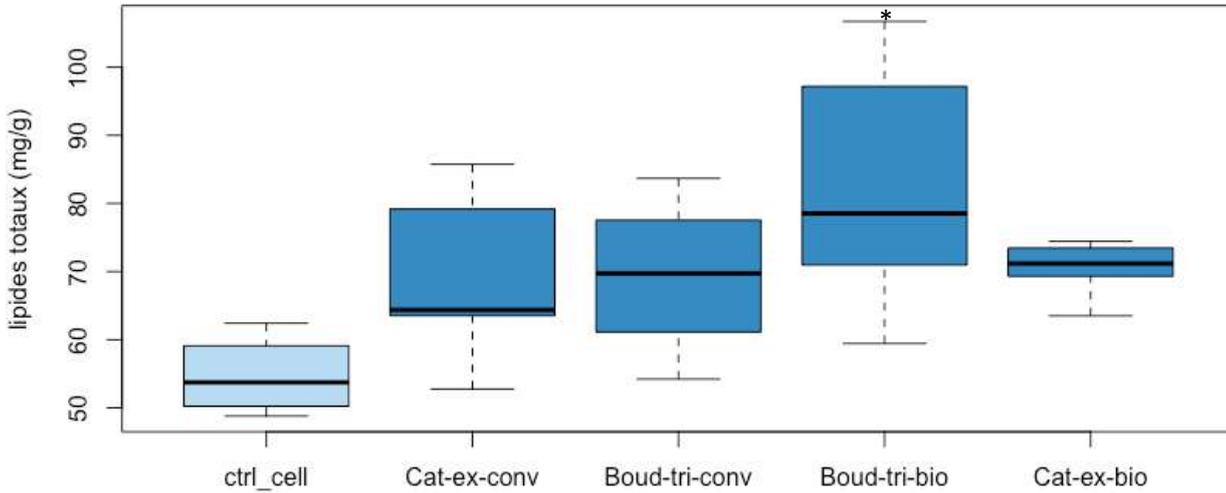


Figure 11 : Quantité de lipides totaux (mg d'équivalent cholestérol par g de moule lyophilisée et broyée) après 100 jours d'exposition aux conditions contrôle (cellulose), filet de catinage extrudé conventionnel INTERMAS (Cat-ex-conv), Boudin de naissains tricoté coton + PP (Boud-Tri-Conv), Boudin de naissains tricoté PLA + PP (Boud-tri-Bio), filet de catinage Extrudé SEA212 de Seabird (Cat-ex-bio). * représente la significativité de la condition par rapport à la cellulose avec p<0,05.

4.4. Réserves énergétiques : les protéines totales

La quantité de protéines totales (en équivalent albumine BSA) ne diffère pas significativement (Anova et test LSD, N=5, p>0,05) entre les moules exposées à la condition conditions contrôle (cellulose) et aux différentes matières testées sur 100 jours (Figure 12). Une différence significative est observée entre la condition cat-ex-bio (SEA 212) et les conventionnels cat-ex-conv et boud-tri-conv.

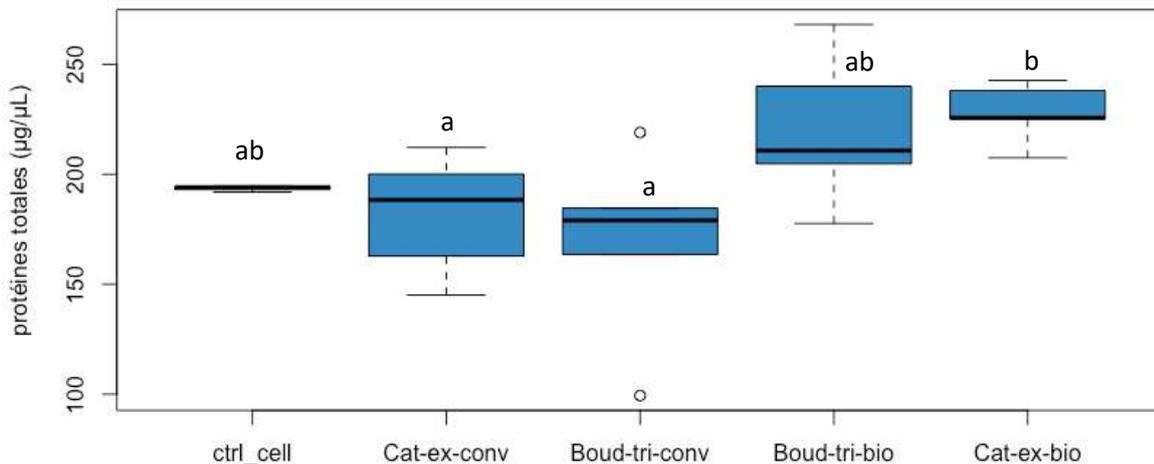


Figure 12 : Quantité de protéines totales (mg d'équivalent BSA par g de moule lyophilisée et broyée) après 100 jours d'exposition aux conditions contrôle (cellulose), filet de catinage extrudé conventionnel INTERMAS (Cat-ex-conv), Boudin de naissains tricoté coton + PP (Boud-Tri-Conv), Boudin de naissains tricoté PLA + PP (Boud-tri-Bio), filet de catinage Extrudé SEA212 de Seabird (Cat-ex-bio)

4.5. Protéines de stress : HSP70 (Hors devis)

Les marquages des HSP70 chez les moules ne diffèrent pas entre les conditions Contrôle, et les différentes matières testées sur 100 jours d'exposition (**Figure 13**).

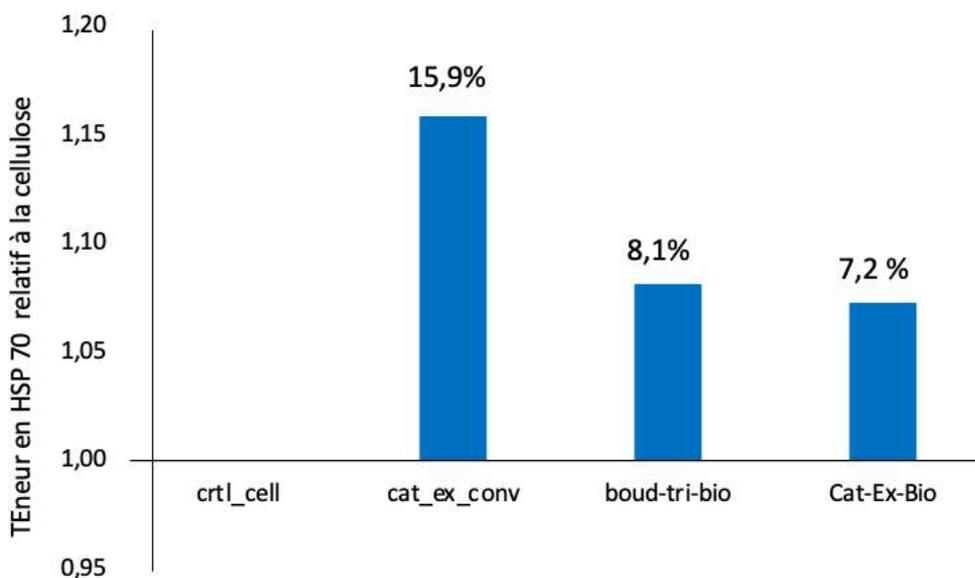


Figure 13 : Quantité relatives de HSP70 dans les différentes matières testées : filet de catinage extrudé conventionnel INTERMAS (Cat-ex-conv), Boudin de naissains tricoté coton + PP (Boud-Tri-Conv), Boudin de naissains tricoté PLA + PP (Boud-tri-Bio), filet de catinage Extrudé SEA212 de Seabird (Cat-ex-bio)

La teneur mesurée de HSP70 dans les pools d'individus après une exposition de microparticules à une dose 5x fois supérieure à la teneur environnementale sont supérieurs à ceux de la cellulose à hauteur de 17% pour les filets conventionnels (cat-ex-conv), 8,1% pour le filet à boudin de naissains PLA + PP (Boud-tri-bio) et 7,2% le filet de catinage extrudé SEA212 (cat-ex-bio).

5. Discussion & Conclusion générale

La présente étude avait pour objectif d'évaluer la toxicité potentielle d'alternatives aux filets de catinage extrudés et tricotés du SMIDAP sur des organismes marins dans le cadre du projet TOX REIPLIC. Ce projet s'est déroulé avec succès et apporte plusieurs résultats d'intérêt aux questions à l'origine du projet.

Le bilan des connaissances actuelles démontre que les effets d'un polluant peuvent différer selon le temps d'exposition due à la mise en place de différents mécanismes moléculaires et physiologiques sous-jacent²³. En effet, les effets d'exposition de concentrations réalistes en particules plastiques sur des expérimentations long terme, mesurée selon des indicateurs à différents niveaux d'intégration biologiques sur un modèle biologique, permettent ainsi de mieux appréhender leurs devenir dans l'environnement. La moule *Mytilus galloprovincialis* est déjà connue pour être un bon indicateur de multiples contaminants en milieu naturel aquatique, par sa forte capacité bioaccumulatrice de divers polluants organiques, métaux lourds et bactéries, et par son ubiquité le long des côtes françaises²⁴. Plastic At Sea utilise dans le cadre de cette étude les effets des particules issues des matières testées, bioaccumulées par cet organisme, sur son état de santé mesuré au travers de plusieurs paramètres biologiques.

Dans le cadre de cette étude, il a été démontré que la moule *M. galloprovincialis* a la capacité de bioaccumuler sur 4 mois des particules de même taille issues des quatre différentes matières testées, ne suggérant pas de sélectivité de l'espèce à l'égard des différentes types de matières. Les potentiels effets biologiques testés chez la moule en réponse à ces expositions, étaient ceux pouvant être liés à des effets physiques (due à l'abrasion), biologiques et chimiques (due à l'ingestion et l'incorporation dans les tissus)²⁵.

Pour autant, malgré la bioaccumulation des particules dans les tissus, peu d'effet a été observé sur la biologie des organismes après une exposition sur 100 jours à la concentration 5 fois supérieure à la concentration environnementale classiquement utilisée^{26,27,28}. L'absence d'effet observé à l'échelle de l'organisme sur les paramètres biologiques de la moule soumise aux différentes matières durant 100 jours indique l'innocuité de ces matières dans la concentration du test sur le modèle moule marine. En effet, ni les composantes énergétiques ni la croissance des coquilles n'ont été altérées par rapport à la conditions contrôle.

Il est à noter que les organismes exposés à la matière utilisée pour les filets de catinage Extrudé SEA212 de Seabird (Cat-ex-bio) contiennent significativement plus de protéines totales que ceux exposés aux matières conventionnelles (Cat-ex-conv et boud-tri-conv). De plus, les organismes exposés à la matière conventionnelle (Cat-ex-conv) expriment davantage de protéines de stress par rapport à ceux exposés aux

²³ Coutellec and Barata, 2013. Special issue on long-term ecotoxicological effects: an introduction.

²⁴ Li et al. 2019. Using mussel as a global bioindicator of coastal microplastic pollution.

²⁵ Mao et al. 2022. The impact of microplastic pollution on ecological environment: a review.

²⁶ Chapron et al. 2018. Macro-and microplastics affect cold-water corals growth, feeding and behaviour

²⁷ Mouchi et al. 2019. Long-term aquaria study suggests species-specific responses of two cold-water corals to macro-and microplastics exposure.

²⁸ Cheng et al. 2023. Impacts of microplastics and the associated plastisphere on physiological, biochemical, genetic expression and gut microbiota of the filter-feeder amphioxus.

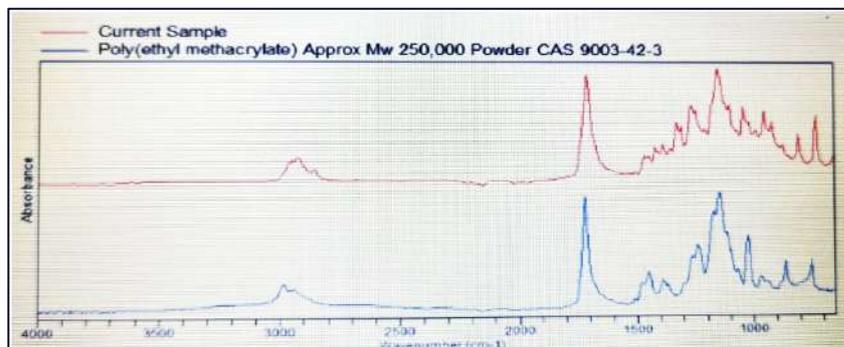
alternatives. Cela suggère que les matières conventionnelles (ici cat-ex conv) induiraient un stress plus important chez les moules après 100 jours d'exposition.

En effet, l'une des voies impliquées dans la réponse au stress mesurée au travers de l'augmentation de protéines chaperonnes HSP70 a pu être mise en évidence sur les 3 matières testées comparativement à la cellulose grade 42 après 100 jours, plus marquée pour la matière servant à la fabrication du filet de catinage extrudé conventionnel INTERMAS (Cat-ex-conv) mesurée ici de manière relative en Western Blot. Ces analyses préliminaires devront être validées par ELISA pour conforter ce point. Dans le cadre de cette étude, la variabilité inter-individuelle des moules en termes de réserves énergétiques étant supérieure à celle générée par l'exposition aux matières, conforte la capacité de ces moules à s'acclimater aux microparticules dans la gamme de concentration du test sur 100 jours.

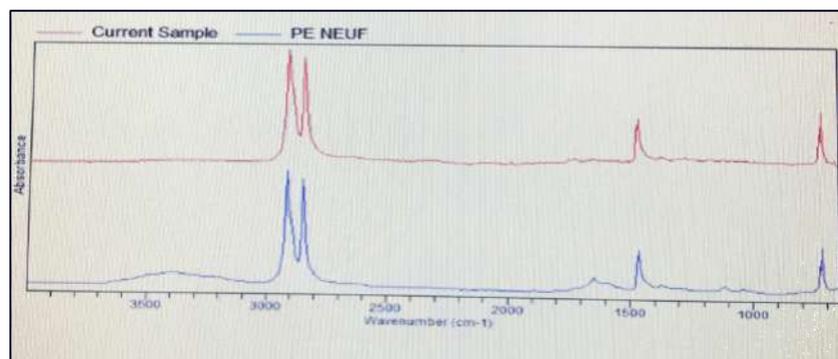
Les résultats de bioaccumulation couplés aux mesures biologiques permettent de conclure sur la capacité des moules à maintenir leurs fonctions physiologiques essentielles (métabolisme) et secondaires (croissance) en présence des particules testées. Ainsi, un environnement marin contenant des particules à la concentration de l'essai issues de ces matières n'impacterait pas le rôle écosystémique des moules.

De plus amples tests pourraient être conduits afin d'affiner la comparaison de toxicité entre ces matières en augmentant la concentration de l'essai à 10 fois la concentration environnementale, connue pour avoir des effets physiologiques sur ce modèle. De plus, nous ne pouvons pas relativiser le nombre de particules émises dans le cadre de ce test à celles émises par l'usage de ces filets dans l'environnement (en g et nombre de particules par usage), ne permettant pas d'extrapoler ces résultats aux effets de leur usage en milieu marin.

6. Annexes

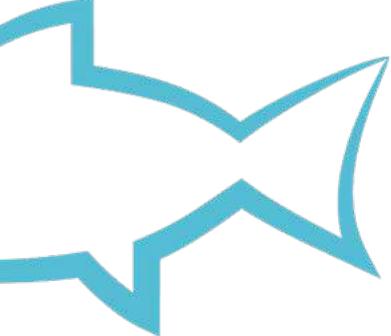


Annexe 1 : Spectre FTIR de l'échantillon de filet de catinage SEA 212 (cat-ex-bio)



Annexe 2 : Spectre FTIR de l'échantillon de filet de catinage extrudé conventionnel INTERMAS (Cat-ex-conv)

PLASTIC AT SEA



www.plasticatsea.com

+33 (0)7 69 65 19 83 – contact@plasticatsea.com



facebook

[/Plastic-at-sea](https://www.facebook.com/Plastic-at-sea)



twitter

[@Plasticatsea1](https://twitter.com/Plasticatsea1)



YouTube

[/Plastic Sea](https://www.youtube.com/PlasticSea)

Siège social

3 impasse Pablo Neruda – 66690 Saint-André

Siège opérationnel

Observatoire Océanologique de Banyuls

1 rue Pierre Fabre – 66650 Banyuls-sur-Mer



Ligépack

L'INNOVATION AU SERVICE DE L'EMBALLAGE ALIMENTAIRE

Test consommateur SMIDAP Emballage Huîtres et Moules





Sac en plastique souple : Imprimé ou non, avec des poignées, en liasse



Boîte en PET rigide : charnière, transparente, empilable



1 - Questionnaire

Périmètre :

Consommateurs sur les marchés et bureaux.

Professionnels sur les marchés du littoral et autres marchés, lors du salon de la conchyliculture à Vannes.

Action :

Questionnaire numérique géré par le sondeur et non par la personne interrogée.

Le sondeur garde la main et peut orienter l'échange suivant les remarques reçues.

La durée du questionnaire est courte (quelques minutes) pour faciliter les réponses spontanées.

Dans le déroulé du questionnaire, il y a plusieurs parties :

- 1^{ère} partie : Habitudes d'achats d'huîtres/de moules et sur l'emballage actuel
- 2^{de} partie : Projection sur l'emballage de demain et le système de consigne ou d'achat

Aussi, nous avons pu avoir des conversations lors des différents échanges. Les remarques les plus pertinentes sont mentionnées dans ces résultats.

Lieux :

Nous avons réalisé les enquêtes en situation d'achat sur les marchés du littoral des Pays de Loire (85 et 44) pendant l'été (La Tranche/mer, Les Sables d'Olonne, Saint Jean de Mont, La Baule, Piriac/mer, ...).

Pour compléter le nombre de répondant, nous avons questionné des personnes hors situation d'achat.

Résultats :

Base de données sur tableur + graphiques

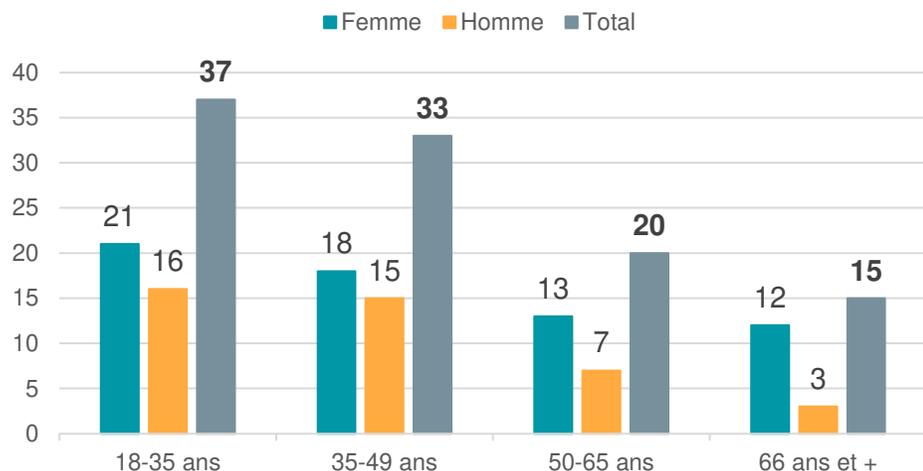
Verbatim des consommateurs et des professionnels



2 - Test consommateurs

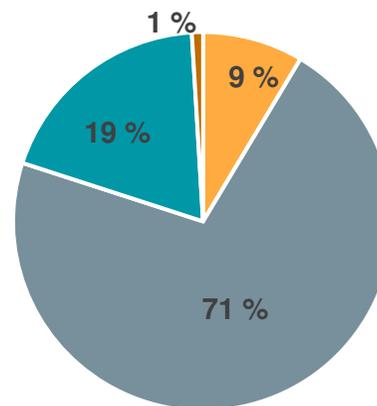
2.1 - Profil des consommateurs :

Age consommateurs



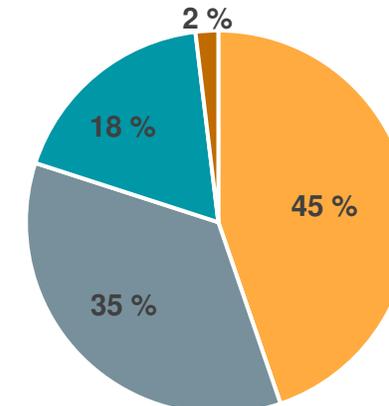
Catégorie Socio Professionnelle

Etudiant Actif Retraité Sans emploi



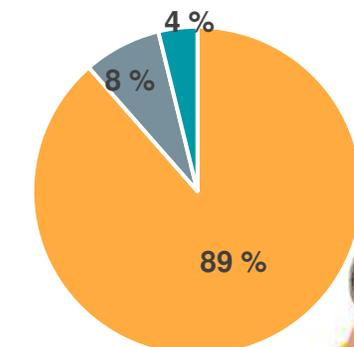
Composition du foyer

Couple Couple + enfant Seul Seul + enfant



Achat Alimentaire

GMS Marché Producteur



Représentativité :

Tranches d'âges jeunes surreprésentées, cela est dû à la période du sondage, pendant l'été sur le littoral.

**Test sur 108 personnes : Mais retenus 105 profils
61% de femmes et 39% d'hommes**

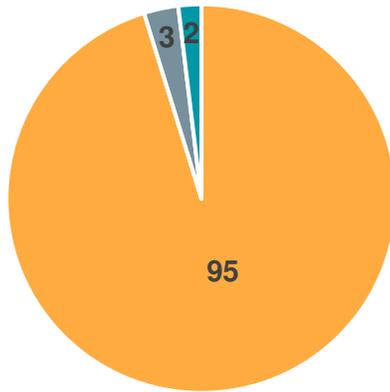


2 - Test consommateurs

2.2 - Habitudes d'achat sur les huîtres et les moules :

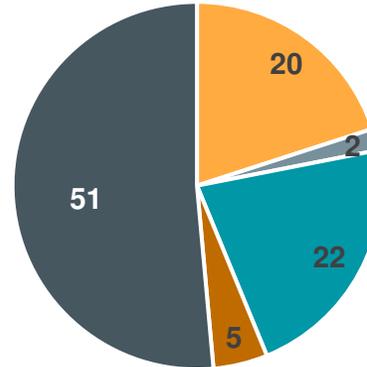
Contenant utilisé lors de l'achat

■ Sac vendeur ■ Sac perso ■ Autres



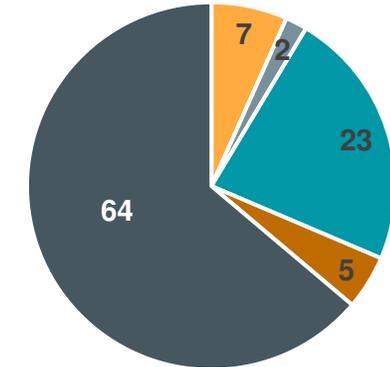
Fréquence d'achat Huîtres

■ 1/semaine ■ 2/mois ■ 1/mois ■ + 1/mois ■ Qq fois/an



Fréquence d'achat Moules

■ 1/semaine ■ 2/mois ■ 1/mois ■ + 1/mois ■ Qq fois/an



Contenant utilisé lors de l'achat et fréquence d'achat :

95 % des personnes utilisent le sac directement proposé lors de la vente. C'est une habitude très ancrée.

=> « *plus pratique et facile* », « *achat non prévu* », « *le sac est étanche et je peux continuer mon marché* »

Il y a quelques habitués locaux avec achat régulier (fréquence hebdomadaire) et qui pensent à apporter leur contenant (sac plastique, sceau, petite bassine) => moins de 3%

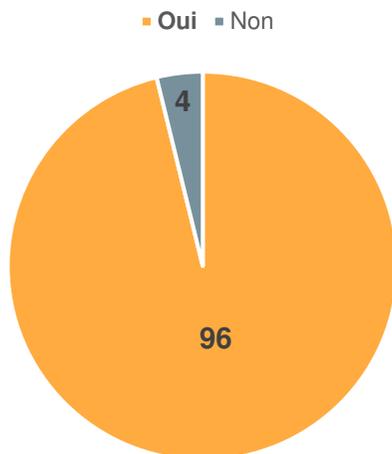
Les achats de fruits de mer sont privilégiés sur quelques moments de l'année (fêtes de fin d'année pour les huîtres et été pour les moules). Les consommateurs n'ont pas de contenant dédié à ce type de produits (« *comme le sac cabas pour les courses qui est utilisé très régulièrement et pour d'autres tâches* »)



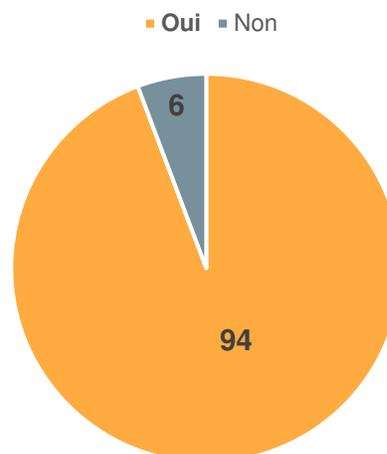
2 - Test consommateurs

2.3 - Emballage actuel : Que pensez-vous de l'emballage actuel ?

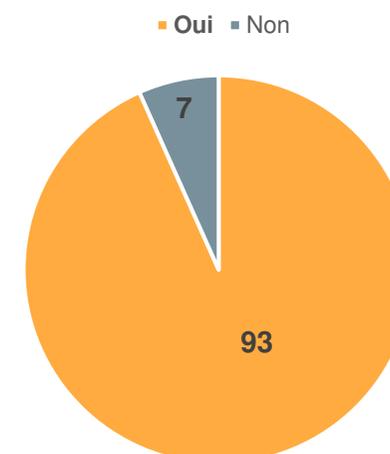
Adapté: étanche, refermable



Adapté au produit



Solide



Commentaires sur cet emballage : *Précisons qu'aucun emballage n'était présenté au consommateur*

Le sac actuel répond aux attentes des consommateurs => **adapté, solide, étanche, refermable.**

Autres commentaires libres : « *Sac en toile spécial offert par le marchand, Pas étanche, Ne garde pas la fraîcheur, Marre du plastique, Pas écologique, TOUT plastique malheureusement.* »

« *Je réutilise d'ancien sac plastique, le sachet me sert de poubelle à la fin* »

Les consommateurs apprécient d'avoir un emballage plastique qui leur garantit une étanchéité (sac, tapis de voiture, panier, frigo, plan de travail). Les poignées sont nécessaires pour le transport.

« *Le sac s'adapte à la quantité que je prends et suit le produit une fois consommé dans la poubelle* ».

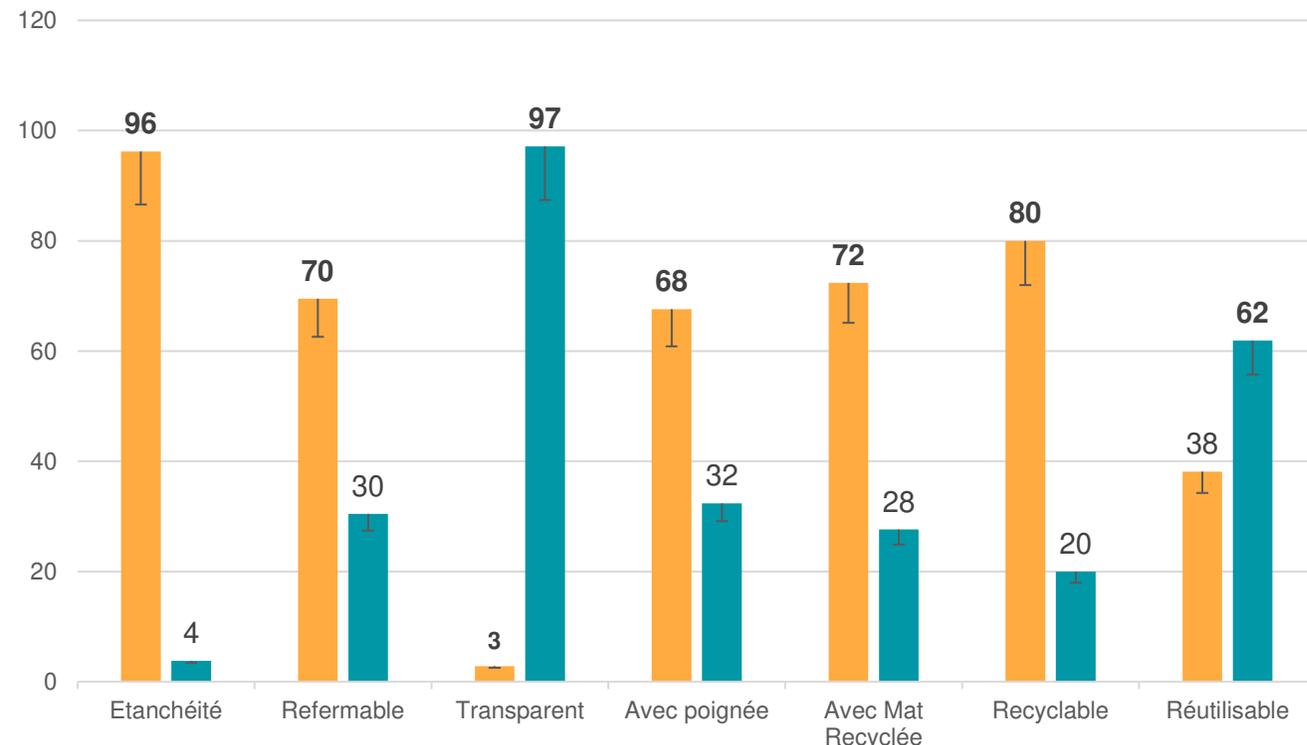


2 - Test consommateurs

2.4 - Critères importants pour un contenant pour les huîtres ou les moules :

Critères importants pour un contenant

■ Oui ■ Non



Fonctionnalités souhaitées :

Etanchéité (96%) : indispensable pour éviter les « *mauvaises surprises* » à la maison ou dans la voiture.

Refermable et avec poignée (70 et 68%) : cela est utile pour « *continuer les courses sans soucis* ». « *Les poignées me permettent de mettre le sac sur mes poignets et d'avoir les mains libres* ».

Aspect environnemental : fait avec de la matière recyclée est une idée qui séduit (72%). La recyclabilité est entrée dans les esprits des consommateurs. Pour eux, le tri = recyclable. Donc les emballages sont tous recyclables.

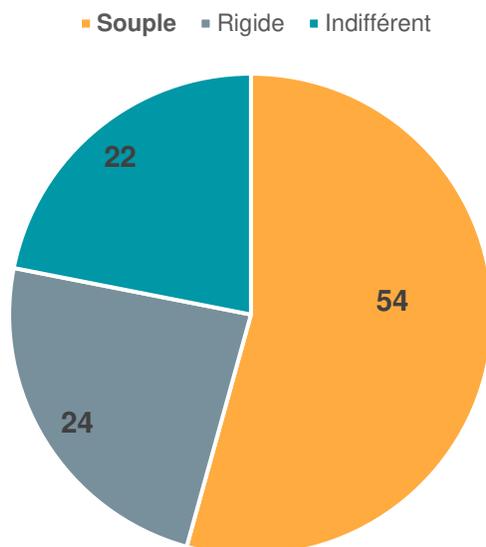
Réutilisable (62%) : La majorité ne souhaite pas réutiliser un sac ayant contenu des fruits de mer. Se pose la question de l'odeur, de l'hygiène, des moisissures, d'une utilisation très ponctuelle. Cependant, 38% se disent prêts à réemployer un emballage pour les fruits de mer ou autres utilisations.



2 - Test consommateurs

2.4 - Critères importants pour un contenant pour les huîtres ou les moules :

Contenant rigide ou souple



Matériau idéal



Matériau idéal :

Plastique (35%) : étanche, léger, ne déchire pas, facile à transporter,

Bois (30%) : renouvelable, approprié aux huîtres, ne s'adapte pas à la quantité, absorbe l'eau, déjà vu

Textile (21%) : idem que le sac plastique mais pas de garantie de l'étanchéité, se lave, crainte sur l'odeur

Carton (6%) : se recycle, pourquoi pas sur un transport petite distance, temps de contact court, si humide perd sa solidité

Métal et Verre (4%) : matériau noble (cher) mais réutilisables et recyclables à l'infini, lourd, prend de la place



2 - Test consommateurs

2.5 - Système préférentiel : Consigne, achat ou aucunes des ces solutions

Retour à la consigne (8%), Simplicité (8%), Economique (5%), Gestion externalisée (3%)

Conviction sur le mode de consommation qui va évoluer. c'est une question de temps! La consigne est une évidence comme cela se faisait avant.

« C'est simple, économique et évident »

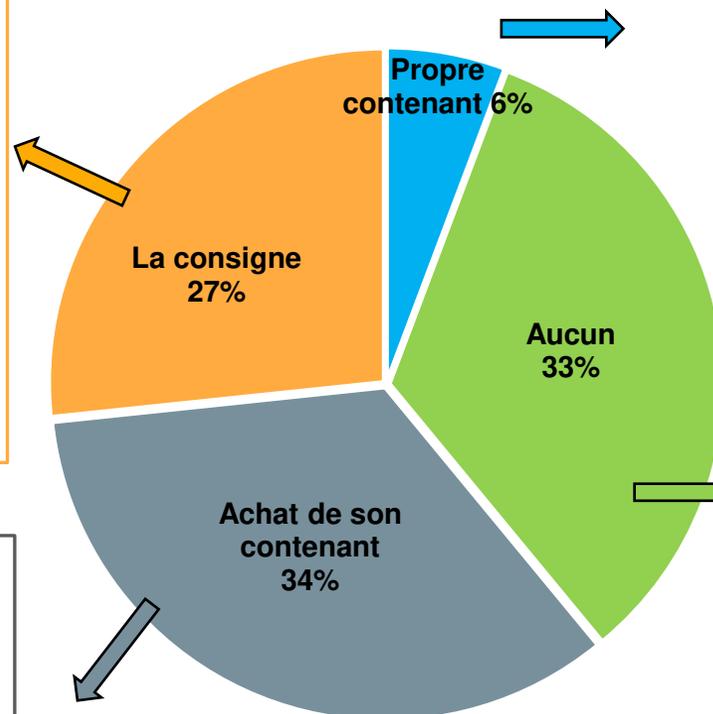
Consommateur engagé

Gestion propreté (13%)

Facilité d'utilisation régulière (16%)

Consommateurs responsables qui ont une prise de conscience et des habitudes de consommer responsable (sac cabas, bocaux, sac en toile, ...). Il faut un contenant dédié, adapté et « *bien pensé* ».

Consommateur responsable



Questions environnementales (3%)

Achat régulier qui concerne les locaux qui habitent à l'année ou qui ont une maison secondaire.

Consommateur impliqué

Odeur et Hygiène (32%)

Cette idée est très présente pour les consommateurs. Les fruits de mer dégagent de l'eau et de l'odeur. La crainte porte sur le lavage, les moisissures, utilisation rare, oubli à la maison, encore un autre sac à mettre dans le coffre de la voiture.

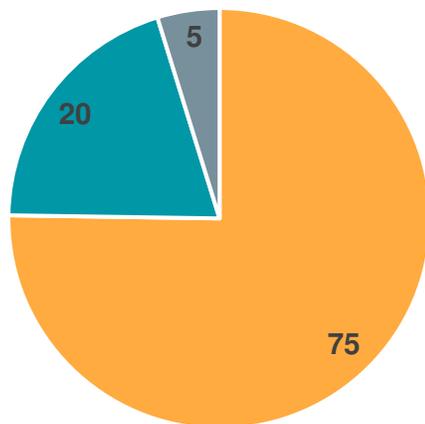
Consommateur perplexe



2 - Test consommateurs

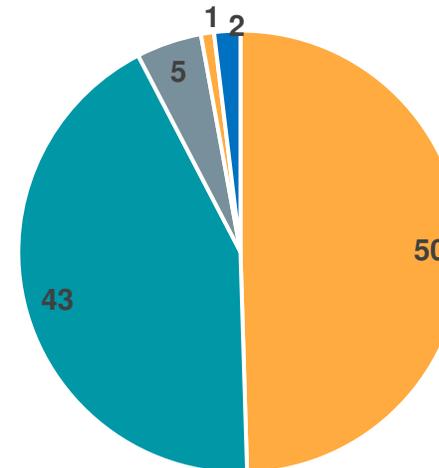
2.5 - Système préférentiel : Consigne, achat ou aucunes des ces solutions

Prix d'une consigne acceptable



■ €1 ■ €3 ■ €5

Prix d'achat de votre contenant



■ moins 1€ ■ 1 à 3€ ■ 4 à 7€ ■ 7 à 10€ ■ plus 10 €

Le prix d'un emballage consigné et acheté :

Le prix sur les produits alimentaires est un sujet sensible surtout depuis un an. Alors évoquer le fait de rajouter un coût supplémentaire lors de l'achat, cela n'est pas forcément bien accueilli.

Prix d'une consigne à 1€ : pour le consommateur c'est l'euro symbolique. Il n'y a pas (ou peu) de repère sur des emballages consignés.

Prix de l'achat d'un contenant de 1 à 3€ : le client se dit prêt à investir dans son propre contenant mais à un coût raisonnable et à condition que l'emballage soit bien pensé (lavable, étanche, léger, pratique, ergonomique, réutilisable,)



2 - Test consommateurs

2.6 - Remarques : Les consommateurs se sont exprimés en fin de test ...

Sur la forme

Le sac à poignée est important pour continuer mon marché, je le porte à mon poignet et j'ai les mains dispo pour le téléphone ou le porte monnaie.

Un contenant rigide serait idéal pour ce type de produit humide et odorant. Par contre, il faut que je pense à l'apporter avec moi lorsque je vais au marché.

C'est bien d'avoir un sac qui se glisse dans mon chariot.

Sur le prix

Je ne me vois pas payer un sac en plus lors de l'achat d'huîtres. Ou alors, il faut que ce sac soit bien conçu et adapté aux fruits de mer. Un peu comme les sacs cabas des grandes surfaces.

1 € c'est déjà bien pour un sac réemployable.

Sur la consigne

Un emballage consigné, pourquoi pas ? De toute façon, il y a beaucoup trop d'emballage jeté à la poubelle. Et puis cela irait dans le sens de l'histoire.

Autres remarques positives

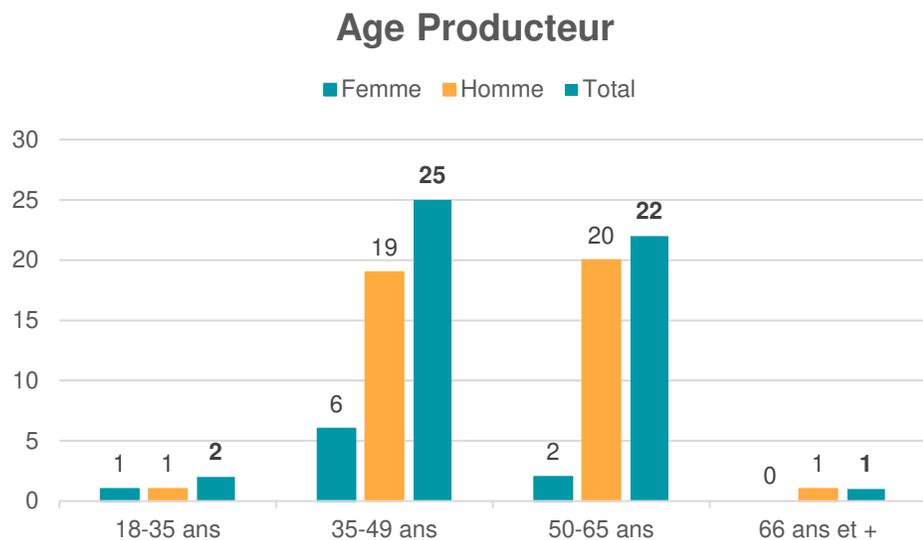
Les emballages réutilisables, je le fais déjà avec les cabas. Ça doit devenir un réflexe.

Que le sac soit consigné ou disponible à la vente, de toute façon, il faut généraliser ces habitudes.



3 - Test producteurs et vendeurs

3.1 - Profil des professionnels :



	85	44	56	Total
Producteur/vendeur	21	8	11	40
Vendeur	8	1	1	10
Total	29	9	12	50
En %	58	18	24	100

Représentativité :

9 femmes et 41 hommes

Profil masculin très majoritaire avec une moyenne d'âge comprise entre 40 et 60 ans

Localisation :

Les professionnels du 85 sont principalement représentés du fait des lieux de l'enquête.

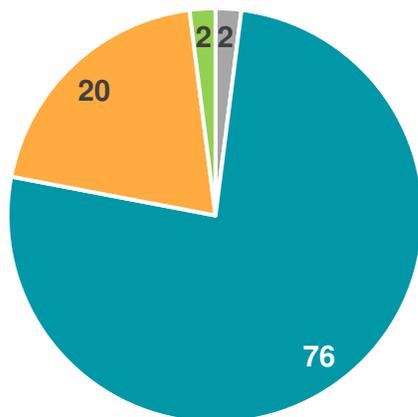
Les professionnels du 56 ont été interrogés lors du salon de Vannes.



3 - Test producteurs et vendeurs

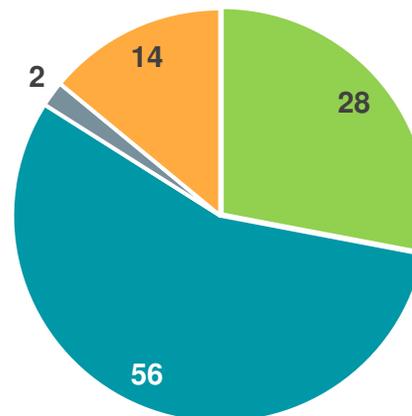
3.2 - Habitudes de ventes et emballage actuel :

Quantité moyenne d'huîtres vendues



■ 1 douzaine ■ 2 douzaines ■ 3 douzaines ■ NC

Quantité moyenne de moules vendues



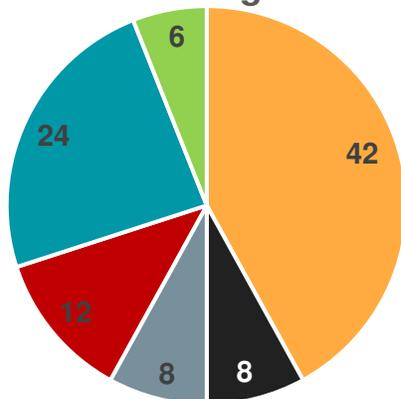
■ 1 kg ■ 2 kg ■ + 2 kg ■ NC

Quantité moyenne de produit :

- Huîtres = 2 douzaines à 76%
- Moules = 2 kg à 56%

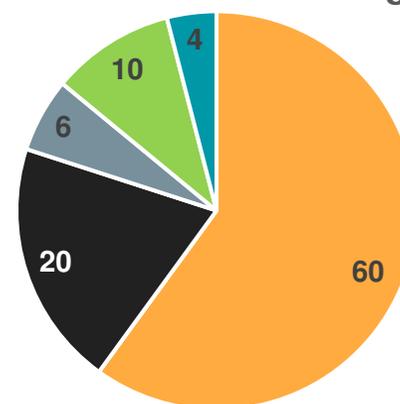
Donc ces quantités/volumes peuvent influencer sur l'emballage final

Quantité d'emballages utilisé / an



■ NSP ■ - 2000 ■ 2000 à 5000 ■ 5000 à 10000 ■ 10000 à 20000 ■ + 20000

Coût unitaire d'emballage



■ NSP ■ 0,03 à 0,05€ ■ 0,05 à 0,07€ ■ 0,10 € ■ + 0,10 €

Quantité et coût de l'emballage :

Une majorité de producteurs ne se prononce pas (ils ne savent pas, ont oublié, noyé dans les frais généraux, c'est la coopérative qui fournit)

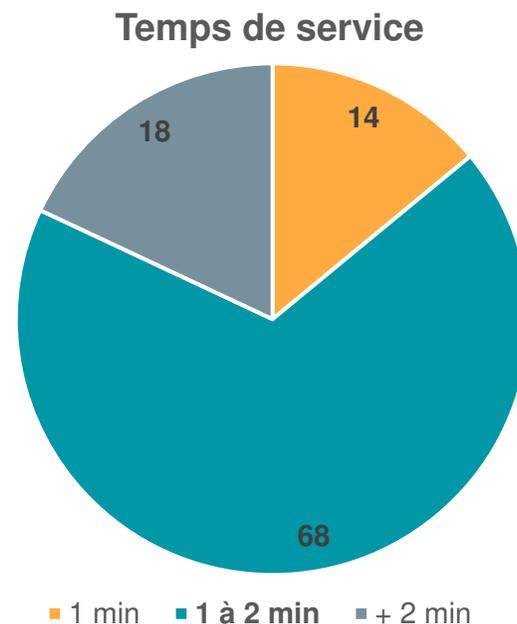
Mais il y a eu des réponses plus précises qui situent le prix entre 0,04 et 0,07€.



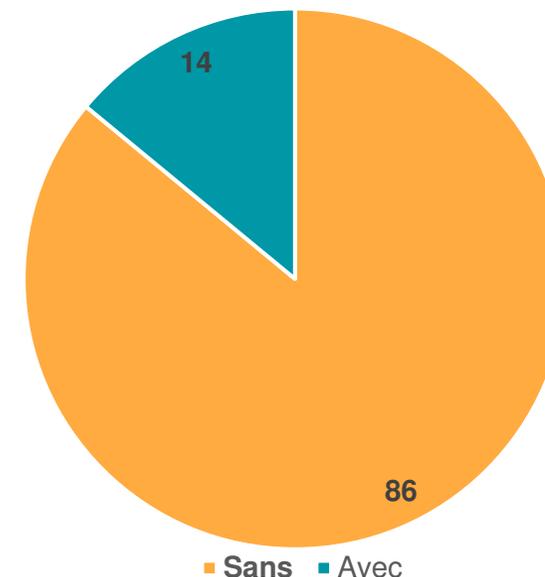
3 - Test producteurs et vendeurs

3.2 - Habitudes de ventes et emballage actuel :

Contenant utilisé	
Sac plastique	Bourriche
49	1
98%	2%
Offert au client à 95%	Facturé



Service avec/sans algues



Service lors de la vente :

Temps de service court car d'autres clients attendent.

Entre la prise de commande, la pesée, l'encaissement et la transmission du sac, la durée est comprise entre 1 et 2 minutes. Les algues sont données à la demande du client et si le producteur en dispose. Ce n'est pas automatique.

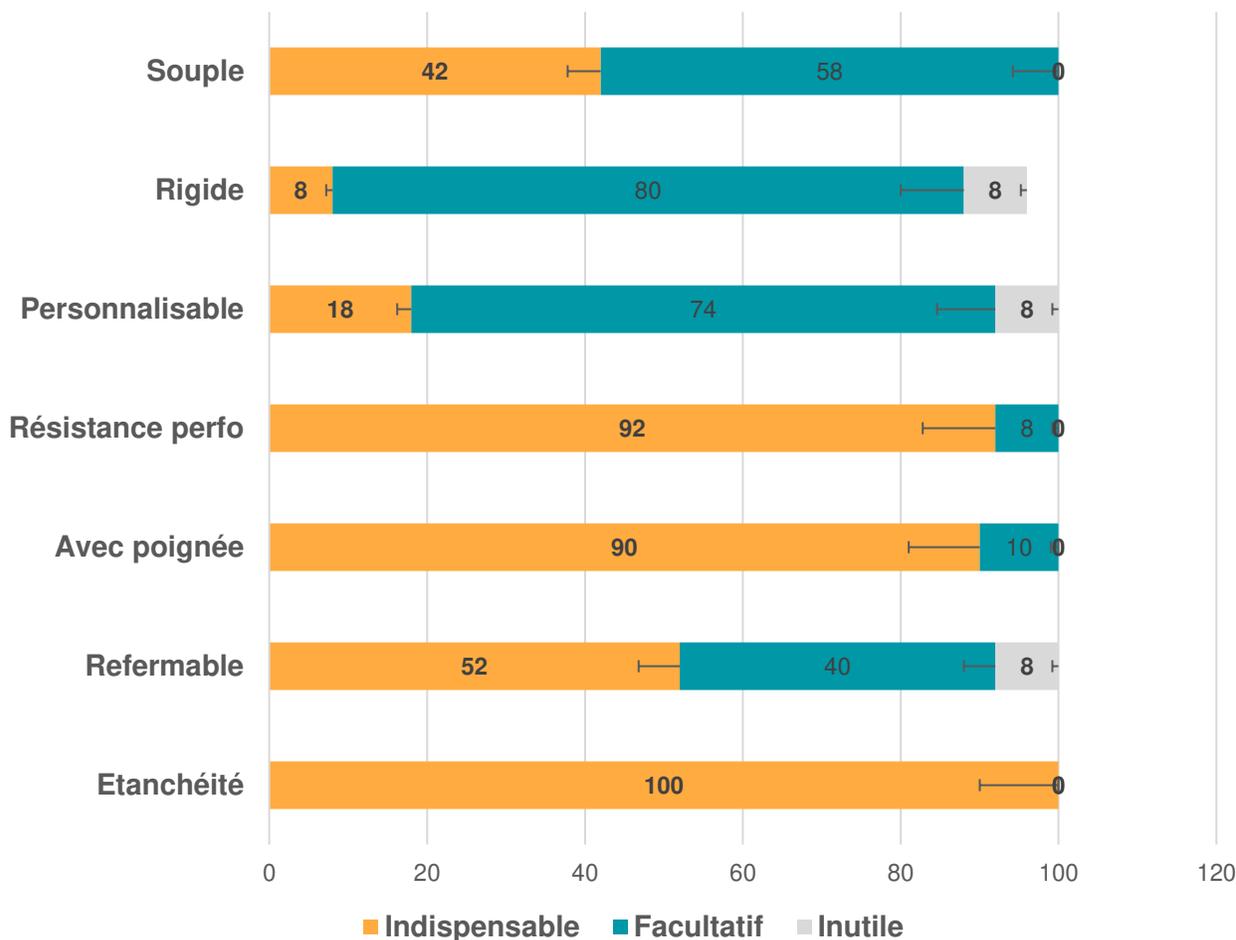
« *Les algues c'est surtout pour les fêtes. Les services véto ont interdit cet usage.* »



3 - Test producteurs et vendeurs

3.3 - Critères importants pour un contenant pour les huîtres ou les moules :

Critères importants pour le contenant



Fonctionnalités souhaitées :

Etanchéité (100%) : Critère non négociable pour les professionnels. La crainte d'une réclamation de leur client.

Refermable et avec poignées (52 et 90%) : Les poignées sont indispensables pour la prise en main du contenant lors du remplissage, lors de la pesée et pour la transmission au client.

Résistance à la perforation (92%) : Le remplissage se fait avec des pelles ou à la main. Les produits ne sont pas « délicatement » déposés. Les coquilles sont parfois coupantes.
« *Hors de question de revoir un client avec un sac qui casse en plein milieu du marché* »

Personnalisable (18%) et rigide (8%) : la personnalisation n'est pas essentielle du moment que le sac remplit les fonctions importantes. « *Ce serait un plus* », « *il vaut mieux privilégier les achats de gros* ». La rigidité pose question sur le stockage avant le service (place, coût, ...)

Souple (42%) : La souplesse permet de « serrer » le produit. Le sac, c'est mieux pour le service surtout si le client prend plusieurs produits en même temps.



3 - Test producteurs et vendeurs

3.4 - Autres attentes : Commentaires libres

Sur l'aspect logistique :

Gain de place (11%) : en amont de la vente (atelier, dans le véhicule, à côté de l'étalage)

Utilisation simple (9%) : utilisation intuitive, pas de perte de temps lors du service (notion de rapidité et efficacité), les sacs sont brochables donc ils sont à hauteur pour une prise en main.

Résistance : D'une part, la résistance mécanique (coquilles coupantes). D'autre part, la résistance contre l'humidité qui commence dès le stockage en entrepôt jusqu'à la cuisine du client en passant par le transport.

S'adapte au produit : Les quantités varient et les calibres varient. Le sac qui colle au produit permet une manipulation plus facile. Il est possible de mettre un sac dans un sac (exemple des bulots ou des pinces de crabes).

Léger : pour la tare, c'est important.

Attentes formulées au fil du questionnaire :

Ne perce pas. Préfère de la qualité, plutôt que quelque chose qui déchire trop vite.

Attention au prix déjà que c'est une période compliquée pour nous.

Déjà testé les sacs biodégradables et compostables. Mais beaucoup trop fragiles et chers. Pas d'intérêts.

Utilisation avec des gants qui s'ouvrent facilement.

S'ouvre facilement, pas de soudure, pas de cerclage.

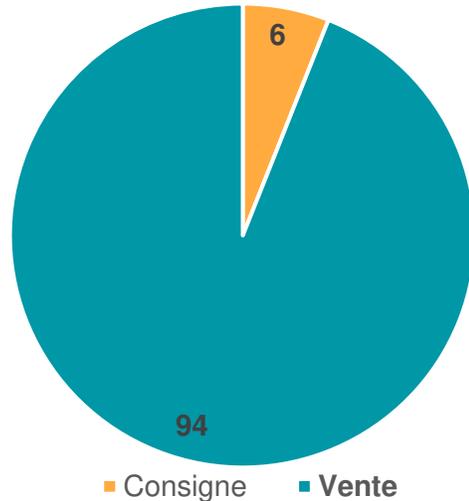
2 ou 3 formats pour s'adapter à la quantité, mais c'est vrai que ça fait trois stocks à gérer. Sur du sac, c'est possible.



3 - Test producteurs et vendeurs

3.5 - Système préférentiel entre la consigne ou la vente :

Système préférentiel



Pourquoi, la vente plutôt que la consigne ? :

Simplicité pour les vendeurs : gestion simplifiée, gain de temps, gain d'espace (pas de zone pour les emballages sales), simple pour la caisse (pas gestion de flux de trésorerie)

Hygiène : pas de responsabilité sanitaire, casse sur un emballage, usage inapproprié d'un emballage qui revient dans le circuit

Responsabilité client : ramène son contenant, le client fait attention à son emballage, démarche éco responsable, possibilité d'acheter chez des collègues (multi commerçant)

Logistique : 1 seul stock d'emballage neuf (pas gestion entre les contenants neuf et les usagés)

Questionnement sur la consigne ? :

Est-ce qu'on est prêt nous les producteurs et la filière ? Est-ce que le client est prêt ?

Qui lave ? Où ? Comment ? Et à quel tarif ? Le circuit logistique existe-t-il ?

Comment gérer les emballages qui reviennent ? Codes barres, logiciel spécial, si l'emballage est cassé ?

Pas trop cher

Il faut que les gens jouent le jeu. Et attendant, on perdra de l'argent et des clients ?

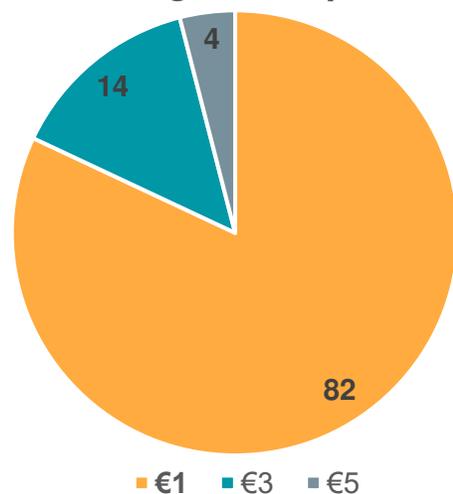
Faut-il reprendre les emballages des collègues ?



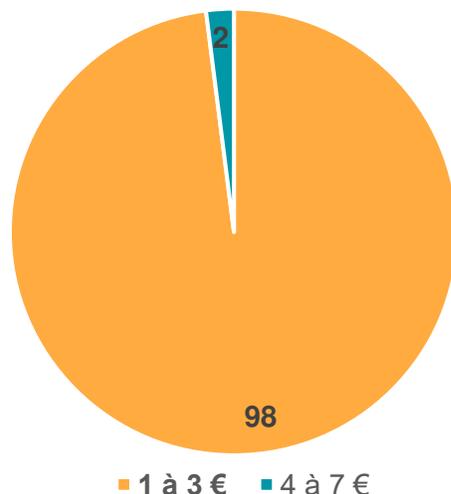
3 - Test producteurs et vendeurs

3.5 - Systeme preferentiel entre la consigne ou la vente :

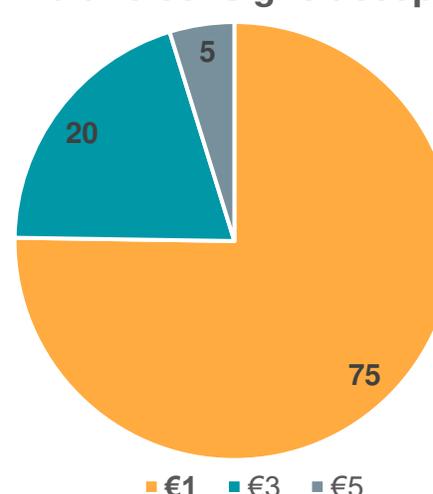
Prix consigne acceptable



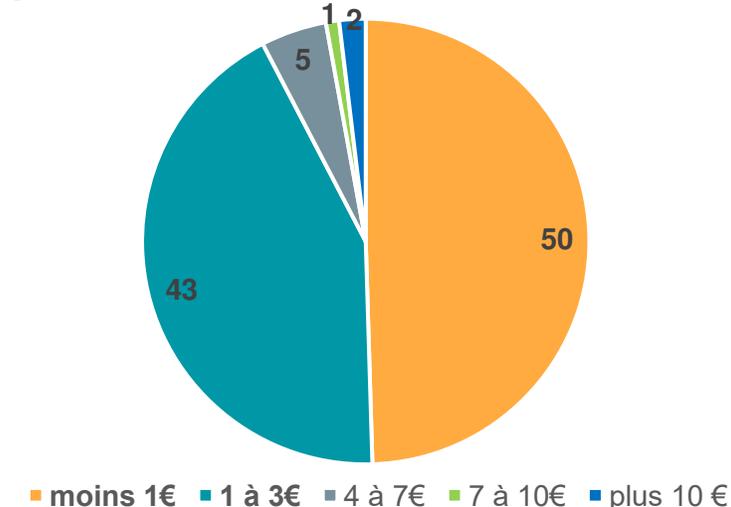
Prix de vente contenant



Prix d'une consigne acceptable



Prix d'achat de votre contenant



Vision des professionnels :

- Consigne à 1€ (82%)
 - Vente d'un contenant entre 1 et 3€ (98%)
- Les vendeurs craignent qu'une consigne ou qu'un emballage trop cher dissuade le client pour un acte d'achat.

Vision des consommateurs :

- Consigne à 1€ (75%)
 - Vente d'un contenant maximum 3€ (93%)
- Ces données sont du déclaratif. Dans les faits, les consommateurs peuvent agir autrement.



3 - Test producteurs et vendeurs

3.5 - Remarques : Les pro se sont exprimés en fin de test ...

Sur la forme

Une matière qui passerait à la machine à laver. Facile à laver, quelque chose de beau et de pratique. Revenir sur un grammage de sac plus fin afin d'éviter de polluer plus. Aujourd'hui le sac plastique, il est critiquable. Mais c'est ce qu'il y a de mieux pour notre business. Le remplacer par autre chose pourquoi pas ? Mais attention de ne pas décevoir les clients parisiens. Surtout, il doit rester pratique pour la vente. Il me faut des poignées pour donner le sac par-dessus l'étalage au client (Les personnes âgées).

Sur le prix

Pas trop cher. 1€ c'est correct. Au-delà, ça devient trop cher pour les gens surtout dans le contexte actuel. Emballage à la vente 1€, pas plus. Le prix unitaire à la vente 1 à 3€ c'est déjà trop cher.

Sur la consigne

Les touristes, l'été, ils ne ramèneront pas le sac. Donc c'est perdu pour tout le monde. La consigne, c'est bien mais si le pro n'a pas la charge de faire l'entretien. La consigne, c'est un sacré chantier. Pour une consigne, il faut un contenant rigide pour la réutilisation et le lavage. Pourquoi pas avoir 2 à 3 formats ?

Autres remarques positives

Si il y a création d'un emballage en local, c'est une belle initiative avec une vrai démarche d'éco conception. Bonne idée. Ça serait bien d'avoir du Made in France. Nos produits sont Made in France.



4 - Comparaison entre la vision des consommateurs et des professionnels

Vision des professionnels :

Sur le contenant :

Contenant étanche, avec des poignées, qui s'adapte au produit, résistant à la perforation, facile à utiliser, avec un temps de service court, simple à stocker dans un environnement humide, peu cher.

Sur la consigne :

Trop contraignant en terme de logistique (stockage avant et après utilisation)
Question de l'hygiène omniprésente
Responsabilité du nettoyage et la gestion ?
Prix de 1€ maximum

Sur la vente du contenant :

Plus simple, pas de responsabilité (hygiène, casse, retour, ...)

Vision des consommateurs :

Sur le contenant :

Contenant étanche, avec des poignées, qui s'adapte au produit, résistant à la perforation, qui sert de poubelle, avec de la matière recyclée et recyclable

Sur la consigne :

Démarche qui séduit, réduction des emballages
Il faut penser à rapporter son contenant
Prix de 1€ maximum

Sur l'achat du contenant :

Utilisation ponctuelle, question sur l'hygiène (odeur, moisissure),
Système identique au sac cabas
pas trop cher entre 1 et 3€



5 - Quels emballages pour demain ?

5.1 - Emballages vendus aux clients et réemployables :



Sacs plastiques isothermes



5 - Quels emballages pour demain ?

5.1 - Emballages vendus aux clients et réemployables :



Sacs en tissu



Sacs en plastiques tissés

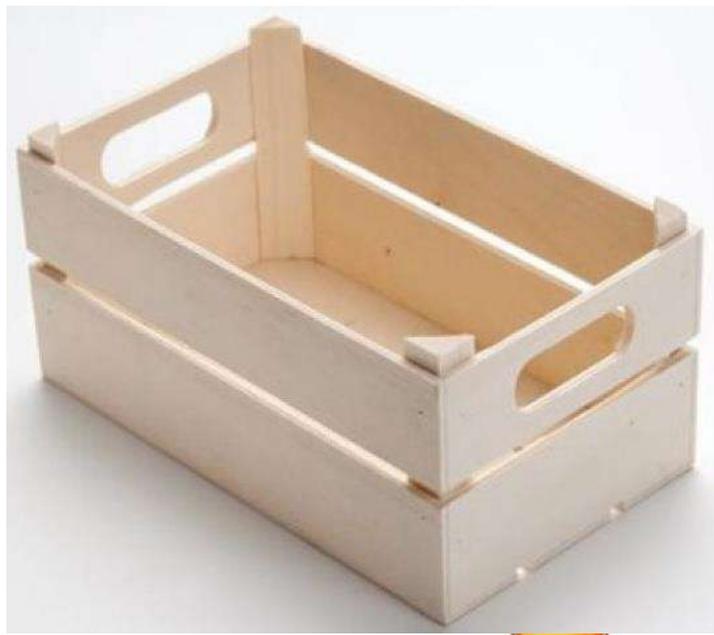


5 - Quels emballages pour demain ?

5.1 - Emballages vendus aux clients et réemployables :



Contenants en bois agrafés ou collés, imprimés ou non



5 - Quels emballages pour demain ?

5.1 - Emballages vendus aux clients et recyclables :



Contenant en carton complexé avec une couche de plastique imprimé ou non



5 - Quels emballages pour demain ?

5.1 - Emballages vendus aux clients et réemployables :



Contenant en plastique rigide, avec couvercle, avec poignée, avec couleur

Le plastique rigide peut se recycler dans une filière B to B



Questions & Echanges





Ligépack

L'INNOVATION AU SERVICE
DE L'EMBALLAGE ALIMENTAIRE

Sylvie MOISON

Directrice générale

☎ +33 (0)7 77 26 10 48

✉ s.moison@ligepack.com

Julien GALLOT

Ingénieur emballages

☎ +33 (0)7 86 29 63 48

✉ j.gallot@ligepack.com



☎ +33 (0)2 43 47 36 85
✉ contact@ligepack.com

📍 57 Boulevard Demorieux,
72000 Le Mans, France

SIRET : 534 345 921 00041
NAF : 9499Z
N° TVA : FR 61 543 345 921

www.ligepack.com -----