

# Mastère Spécialisé® Economie Circulaire et Organisation Durable (ECOD)

## Feasability Study 2021 - 2022



## La déconstruction des voiliers

Angèle Lepeltier  
Camille Hantisse

Tuteur/Tutrice Ecole :  
Patrick Pujol

Tuteur/ Tutrice Organisme :  
Aurélien Bringer – V2E

*Homme libre, toujours tu chériras la mer !*

Charles Baudelaire

*Les Fleurs du Mal* : « *L'Homme et la mer* »

## Table des matières

Table des illustrations.....	5
I. Introduction : .....	7
II. Analyse de l'existant .....	8
A. Les typologies et l'usage des voiliers.....	8
B. Problématiques actuelles liées à la déconstruction et aux exutoires.....	10
1. Les freins juridiques .....	10
2. Les freins financiers .....	10
3. Les freins concurrentiels.....	10
4. Autres .....	10
C. Aspects réglementaires et la naissance de l'APER .....	11
III. Les matériaux d'un voilier type.....	17
A. Exemple de voilier type : le J80 .....	17
B. Les matériaux utilisés pour la construction des coques.....	20
1. Les coques en panneaux sandwich.....	20
a) Le principe du panneau sandwich .....	20
b) Les matériaux constituant l'âme .....	20
2. Les coques en résine composite .....	22
a) Les constituants .....	22
(1) La matrice.....	23
(2) Le renfort.....	24
b) La mise en œuvre.....	25
(1) Le moulage au contact.....	25
(2) Le moulage par projection instantanée.....	26
(3) Le moulage par injection basse pression .....	26
(4) Le moulage par infusion.....	27
3. Avantages et inconvénients du panneau sandwich.....	27
C. Les voiles.....	29
D. Les mâts.....	30
E. Les cordes.....	31
F. La quille.....	32
G. Les équipements électroniques.....	32
H. Ce qui se fait dans le monde.....	33
1. La fin de vie des navires dans le monde.....	33
2. Les matériaux alternatifs dans le monde .....	34

I.	Autour du voilier : entretien, lavage.....	34
IV.	Vers une industrialisation des déchets nautiques ?.....	36
A.	Ecologie Industrielle et Territoriale (EIT).....	36
B.	Les acteurs économiques qui utilisent des matériaux composites.....	37
V.	Quels sont les exutoires ? .....	40
A.	Une alternative : l'écoconception - penser et fabriquer durablement.....	40
1.	Les différents matériaux biosourcés qui peuvent composer une coque .....	40
a)	Les fibres naturelles.....	41
b)	Les panneaux sandwichs .....	42
2.	Quelques inconvénients aux fibres végétales .....	43
3.	Comment choisir les matériaux bio sourcés ? .....	43
4.	Le bois et le strip-planking .....	44
B.	Les limites du réemploi : et si d'autres secteurs étaient intéressés ?.....	46
C.	Exutoires, actuels et potentiels futurs, des coques en résine composite.....	49
1.	Exutoires actuels.....	49
a)	Le broyage.....	50
b)	Le procédé mécanique.....	50
c)	Le procédé thermique .....	51
(1)	Incinération.....	51
(2)	Thermolyse.....	52
(3)	Pyrolyse .....	53
d)	Le procédé chimique .....	53
2.	Exutoires en recherche .....	54
a)	La séparation du renfort en carbone et de la matrice.....	54
b)	Le laminage à froid.....	54
c)	Le processus de dépolymérisation.....	55
d)	La vapo-thermolyse .....	55
VI.	Conclusion.....	56
VII.	Les prochaines étapes du projet :.....	57
VIII.	Bibliographie :.....	58
IX.	Remerciements .....	61

## Table des illustrations

Figure 1 : Les dériveurs légers .....	9
Figure 2 : Les multicoques de sport .....	9
Figure 3 : Les Dayboats.....	9
Figure 4 : Les petits croiseurs.....	9
Figure 5 : Les bateaux pêche-promenade.....	9
Figure 6 : Les voiliers habitables.....	9
Figure 7 : Les voiliers de grande croisière .....	9
Figure 8 : Les voiliers classiques .....	9
Figure 9 : La belle plaisance.....	9
Figure 10 : Les voiliers de courses .....	9
Figure 11 : Centres agréés APER – Source : APER.....	12
Figure 12 : Les étapes de déconstruction d'un bateau [SCLAVO] .....	13
Figure 13 : Evolution du nombre de bateaux déconstruits entre 2015 et 2021 .....	13
Figure 14 : Répartition des déconstructions par type de bateau [APER] .....	14
Figure 15 : Répartition des déchets par matériaux [APER] .....	14
Figure 16 : APER, fin de vie d'un bateau .....	15
Figure 17 : Immatriculations délivrées en métropole au 31/08/2020. [GOUV].....	16
Figure 18 : Photo d'un voilier J80 en mer.....	17
Figure 19 : Schéma d'un J80 et de ses éléments constitutifs .....	18
Figure 20 : Le principe du panneau sandwich.....	20
Figure 21 : Mousse PVC .....	20
Figure 22 : Mousse Corecell.....	21
Figure 23 : Balsa.....	21
Figure 24 : Aluminium .....	21
Figure 25 : Acier inoxydable.....	21
Figure 26 : Polypropylène .....	21
Figure 27 : Fibre d'aramide .....	22
Figure 28 : Schéma de la composition de la résine composite [NOUIGUES].....	22
Figure 29 : Résine polyester .....	23
Figure 30 : Résine époxyde .....	23
Figure 31 : PVC.....	23
Figure 32 : PE.....	23
Figure 33 : PP.....	23
Figure 34 : Fibre de verre .....	24
Figure 35 : Fibre de carbone.....	24
Figure 36 : Tissu de carbone .....	24
Figure 37 : Schéma du moulage au contact [WIKIPEDIA] .....	25
Figure 38 : Schéma du moulage par projection simultanée [THEGOODGOODS].....	26
Figure 39 : Schéma du moulage par injection basse pression [OUESTCOMPOSITES].....	26
Figure 40 : Schéma du moulage par infusion [NOUIGUES] .....	27
Figure 41 : Schémas du délaminage.....	28
Figure 42 : Utilisation de l'aluminium en France par secteur .....	31
Figure 43 : Répartition des caractéristiques des cordes selon le matériau. [CORDAGE].....	31
Figure 44 : Les différents types de quille .....	32
Figure 45 : Répartition des DEEE après leur ramassage en point de collecte.....	33
Figure 46 : Nettoyage d'un bateau sur le vieux port de la plus belle ville de France .....	35
Figure 47 : La déconstruction et la filière – APER .....	36

Figure 48 : Ventilation du marché français des composites par secteur d’application. [CRECOF, 2017]	37
Figure 49 : Répartition des industries utilisant des matériaux composites dans le Sud-Ouest de la France	38
Figure 50 : Propriétés des matériaux constituant les composites	41
Figure 51 : : le Gwalaz	42
Figure 52 : Carte de sélection des fibres de renfort. [MONTI, 2016]	43
Figure 53 : Carte de sélection de l’âme <sup>31</sup>	44
Figure 54 : La construction d'un bateau en bois avec la méthode du strip planking	45
Figure 55 : Bateau en bois en construction sur le vieux port de Marseille.	45
Figure 56 : Façade du Conseil Européen. [OPALIS]	46
Figure 57 : Exemple de sac à main en voile. [727SAILBAGS]	47
Figure 58 : Réhabilitation de bateaux à Yes We Camp à Marseille. [LANE, 2019]	47
Figure 59 : Réhabilitation d'anciens voiliers par l'entreprise Bâtho. [BATHO]	48
Figure 60 : Péniches aménagées à De Ceuvel à Amsterdam. [BESUSTAINABLE]	48
Figure 61 : Matériaux issus d'un voilier en déconstruction. [APER]	49
Figure 62 : Méthode de recyclage des composites. [NOUIGUES]	49
Figure 63 : Etapes de broyage des composites - [HADJER, 2011]	50
Figure 64 : Les produits issus du broyage	50
Figure 65 : Principe de l’incinération dans une unité d’incinération d’ordures ménagères (UIOM) – [HADJER, 2011]	51
Figure 66 : Principe de l’incinération dans une unité d’incinération d’ordures ménagères (UIOM) – [HADJER, 2011]	52
Figure 67 : Principe de la thermolyse - [HADJER, 2011]	53
Figure 68 : Schéma de principe du laminage - [NOUIGUES]	54
Figure 69 : Schéma synthétique des filières de déconstruction	57

## I. Introduction :

Dans les années 70, la navigation est en plein essor à la suite de l'application d'un matériau révolutionnaire alliant fibre de verre et résine : le polyester renforcé. Les constructions de bateau en série se développent grâce aux procédés de fabrication des coques réalisées à l'aide de moules utilisables et réutilisables. Le polyester, ce matériaux résistant, léger et facile d'entretien qui a été le fleuron du nautisme, ne se recycle malheureusement pas. Des dizaines d'années plus tard, le parc de la plaisance et les baby-boomers ont vieilli, laissant aujourd'hui plus de 300 000 bateaux hors-service ou abandonnés, sans compter les bateaux coulés. De plus, 95% des bateaux de plaisance immatriculés en France sont en polyester actuellement. [ADTHERAULT]

Les bateaux hors services n'étant pas recyclés, ils sont donc destinés à l'enfouissement ou à l'incinération.

Dans notre analyse, nous nous attacherons particulièrement à l'étude de la déconstruction des voiliers de plaisance ainsi qu'à leur écoconception, en répondant à la problématique suivante :

*Comment mieux penser, utiliser et déconstruire les bateaux de plaisance ?*

Afin de répondre à cette problématique, nous nous attacherons tout d'abord à mieux comprendre le monde du nautisme et de la plaisance ainsi que les limites actuelles. Dans un deuxième temps, nous creuserons le sujet des matériaux afin de mettre en avant leur complexité mais aussi les déchets qu'ils génèrent. Nous tenterons d'introduire une démarche d'écologie industrielle et territoriale (EIT) pour massifier les déchets et envisager la création de filières de recyclage. Pour terminer, nous verrons les alternatives au recyclage ou bien ce qui permet en amont de mieux concevoir un bateau pour éviter ces problématiques de fin de vie.

## II. Analyse de l'existant

### A. Les typologies et l'usage des voiliers

Les voiliers sont les premiers moyens de transport longue distance (marchandises, hommes, courrier) propulsés grâce au vent. Ils ont permis l'essor de certaines activités comme la pêche, mais ont aussi pu être utilisés comme instrument militaire (bataille navale). La révolution industrielle (XIX<sup>ème</sup> siècle) change la donne et les voiliers sont progressivement remplacés par les bateaux à vapeur.

L'arrivée des bateaux à vapeur change la perception des voiliers qui sont écartés des activités économiques à proprement parler. Les voiliers se voient désormais dotés de nouvelles fonctions : sportive et plaisance qui seront accentuées au XX<sup>ème</sup> siècle (siècle où les loisirs prennent une place plus importante avec la réduction du temps de travail notamment).

Pour répondre aux différents nouveaux usages des voiliers (sport et plaisance), il existe plusieurs typologies de voiliers. On peut les classer de différentes manières : en fonction de la coque (monocoque, multicoques type catamaran ou depuis peu le zéro coque), de la taille ou encore du programme (ce que nous ferons ici (voir photos page suivante)) :

- Figure 1 : Les dériveurs légers

Voilier monocoque, léger, idéal pour de la navigation "de plage", rapide, mais il y a une absence de stabilité.

- Figure 2 : Les multicoques de sport

Voilier comme son nom l'indique qui est multicoque, plus gros que le dériveur léger et plutôt conçu pour la compétition.

- Figure 3 : Les Dayboats

Voilier plaisir monocoque, plus grand que le dériveur léger et plus stable. Son utilisation se divise en 2 programmes : les personnes qui partent à la journée faire de la plaisance et une utilisation plus sportive avec les régates.

- Figure 4 : Les petits croiseurs

Monocoque, moins de 8 mètres donc plus facilement transportable. A partir de 7 mètres, il peut y avoir 2 couchettes doubles donc plus de confort.

- Figure 5 : Les bateaux pêche-promenade

Monocoque, solide, confortable. Réputé pas très beau ni performant, il est pourtant très pratique et conçu pour la pêche. Il n'en est quasiment plus produit aujourd'hui.

- Figure 6 : Les voiliers habitables

Bateaux de 8 à 18 mètres les plus populaires dans le monde de la plaisance. Certains sont plutôt adaptés à des croisières tranquilles, d'autres pour les traversées de la Méditerranée, de la Manche etc...

- Figure 7 : Les voiliers de grande croisière

Bateaux plutôt similaires aux voiliers habitables mais plus lourds en plastique, en acier voire aluminium. La sécurité est la priorité. L'intérieur est très équipé : local technique, cabines etc... (ex : Vulcain 7)

- Figure 8 : Les voiliers classiques

Très grandes voiles et coque très fine, ils sont utilisés à la fois pour la plaisance et la régates (ex : Pen Duick).

- Figure 9 : La belle plaisance

Programme entre la voile classique et la voile actuelle, moins cher qu'un yacht, la coque est souvent en plastique. Ce sont les débuts de la plaisance populaire.

- Figure 10 : Les voiliers de courses

Bateaux de professionnels qui sont souvent des laboratoires d'innovation (ex : Maxi Trimaran)





Figure 1 : Les dériveurs légers



Figure 2 : Les multicoques de sport



Figure 3 : Les Dayboats



Figure 4 : Les petits croiseurs



Figure 5 : Les bateaux pêche-promenade



Figure 6 : Les voiliers habitables



Figure 7 : Les voiliers de grande croisière



Figure 8 : Les voiliers classiques



Figure 9 : La belle plaisance



Figure 10 : Les voiliers de courses

## B. Problématiques actuelles liées à la déconstruction et aux exutoires

### 1. Les freins juridiques

« Comment les ports de plaisance et les chantiers de gardiennage peuvent-ils juridiquement se défaire d'un bateau dit « ventouse » qui loge dans leurs installations, alors qu'ils n'en sont pas propriétaires ? » : Les freins juridiques ont été partiellement levés par deux textes récents (décret n°2015-458 et Loi n°2016-816 pour l'économie bleue) ;

Le fait que les chantiers de déconstruction navale soient des Installations Classées Pour l'Environnement (ICPE) est un frein juridique. En effet, ils sont soumis à des autorisations préfectorales, c'est donc une contrainte en plus pour les déconstructeurs. « Les autorisations préfectorales sont délivrées sous la forme d'arrêtés préfectoraux afin d'imposer aux exploitants le respect d'un certain nombre de prescriptions techniques en vue de limiter leurs impacts environnementaux. L'instruction des demandes d'autorisation d'exploiter ainsi que le contrôle du respect des prescriptions techniques par les exploitants sont réalisés par l'inspection des installations classées ». [WIKIPEDIA]

### 2. Les freins financiers

Les coûts de déconstruction sont aujourd'hui intégralement supportés par le dernier propriétaire du navire, qui ne veut pas toujours assurer le financement de sa déconstruction. Les propriétaires préfèrent généralement l'abandon, la destruction sauvage, voire l'immersion en mer. Selon un déconstructeur agréé APER, 40 % des propriétaires particuliers ne veulent pas payer pour déconstruire leur bateau (entretien de janvier 2016 réalisé par Nautique Conseil) et seule une petite partie des devis est généralement acceptée (autour de 10 % - 20 % selon les déconstructeurs rencontrés).

### 3. Les freins concurrentiels

Les propriétaires sont nombreux à passer directement par les ports de plaisance et les chantiers de gardiennage qui optent pour la déconstruction sur site (par exemple aires de carénage) sans passer par des entreprises du métier. La déconstruction des bateaux de plaisance, notamment de petite taille n'est pas particulièrement technique et de nombreuses méthodes sont utilisées pour diminuer la taille du bateau et pouvoir jeter les parties ainsi produites en déchèterie ou en centre de tri : découpage à l'aide d'une scie sabre ou meuleuse, tronçonnage, aplatissage en roulant dessus, ou en posant une lourde gueuse avec une grue, écrasement avec une pelle mécanique, etc. [ADEME]

### 4. Autres

Il n'y a pas d'assurance obligatoire pour le bateau de plaisance (sauf s'il participe à des compétitions sportives). Cela veut dire que s'il y a d'éventuels dommages sur le bateau, il fonctionnera moins bien et peut potentiellement être abandonné comme beaucoup d'autres en France.

## C. Aspects réglementaires et la naissance de l'APER

L'Organisation de Coopération et de Développement Économique (OCDE) propose en 1980 la notion de responsabilité élargie du producteur (REP), celle-ci est formalisée dans les années 2000 et intégrée en 2012 au Grenelle de l'environnement en France.



Le principe de la création de la responsabilité élargie du producteur est de responsabiliser celui qui fabrique, qui distribue ou qui importe un produit : il doit prendre en charge sa fin de vie. Le producteur et le distributeur doivent ainsi financer, organiser et mettre en place les solutions de collecte, de réutilisation ou de recyclage appropriées pour leurs produits. C'est le principe du « pollueur/payeur ». Ainsi, plus le produit est polluant et plus les coûts de sa fin de vie sont importants pour le producteur. Cela incite donc à l'écoconception des produits et process ainsi qu'au réemploi.

Le producteur doit prendre en charge lui-même les déchets de ses produits en fin de vie ou bien il doit payer une écocontribution à un organisme qui s'occupe des déchets à sa place. Ainsi, l'écocontribution est versée aux éco-organismes par les entreprises qui lui sont adhérentes. Cette écocontribution finance l'ensemble des obligations des fabricants et distributeurs (prévention, transport, collecte, tri, recyclage des déchets...). En demandant aux producteurs de financer la gestion de leurs déchets (via cette écocontribution), ceux-ci ont intérêt à limiter leur production de déchets et à faciliter leur valorisation.

Les filières REP concernent dans un premier temps les 14 secteurs suivants :

- Les emballages ménagers
- Les papiers
- Les équipements électriques et électroniques (DEEE)
- Les éléments d'ameublement (DEA)
- Les produits textiles (TLC) et chaussures
- Les piles et accumulateurs
- Les produits chimiques (DDS)
- Les pneumatiques
- Les véhicules hors d'usage (VHU)
- Les bateaux de plaisance ou de sport
- Les objets perforants des patients en auto-traitement (DASRI)
- Les médicaments à usage humain
- Les bouteilles de gaz
- Les fluides frigorigènes

En février 2020, il y a l'adoption de la loi Anti-Gaspillage pour une Économie Circulaire (AGEC), elle a pour principal objectif la réduction des déchets, de favoriser le réemploi et la communication aux consommateurs. Cette loi crée 11 filières supplémentaires de REP, qui seront mises en place de 2021 à 2025 et qui concernent :

- Les emballages professionnels, y compris pour les emballages utilisés par les professionnels de la restauration
- Les produits ou matériaux de construction du secteur du bâtiment
- Les jouets
- Les articles de sport et de loisir
- Les articles de bricolage et de jardin
- Les huiles minérales ou synthétiques
- Les produits du tabac
- Les gommes à mâcher
- Les textiles sanitaires à usage unique
- Les engins de pêche contenant du plastique

- Les aides techniques médicales

Ainsi, l'Association pour la Plaisance Eco-Responsable (APER) est créée en février 2009 par la Fédération des Industries Nautiques (FIN). Cette association conseille les plaisanciers sur la déconstruction de leur bateau et les met en relation avec les déconstructeurs. A sa création, elle n'est pas financée. Fin 2018, elle candidate au statut d'éco-organisme et en 2019 l'APER est agréé par le Ministère de la Transition Écologique et Solidaire. Ainsi, l'APER a pour objectif d'organiser et d'animer la filière française de déconstruction et de recyclage des Navires de Plaisance ou de Sport Hors d'Usage (NPSHU). L'APER s'occupe de gérer la déconstruction et le recyclage des bateaux de plaisance en fin de vie, à travers l'identification des acteurs de déchet déjà existants et intéressés par la déconstruction nautique et la création d'un réseau. L'APER apporte ainsi des solutions aux détenteurs de bateaux en orientant les bateaux vers des centres agréés de déconstruction locaux où les matériaux seront triés, recyclés et valorisés. *Legifrance* a formulé l'article ainsi :

*“En application de l'article R. 543-303 du code de l'environnement, l'Association pour la Plaisance Eco-Responsable (APER), déclarée à la préfecture de Caen et inscrite au répertoire national des associations sous le numéro W142006486, est agréée sur la base de sa demande d'agrément déposée en date du 2 janvier 2019 et complétée le 16 janvier 2019, pour pourvoir au traitement des déchets issus de bateaux de plaisance ou de sport de l'article R. 543-297 du code de l'environnement, dans le respect du cahier des charges pris en application des articles L. 541-10-10 et R. 543-303 à 305 du code de l'environnement, pour le compte de ses adhérents.”*

La loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) stipule également dans l'article L. 541-10-10 du code de l'environnement que « à compter du 1er janvier 2017 (date ensuite repoussée à 2018), toutes les personnes physiques ou morales qui mettent sur le marché national à titre professionnel des navires de plaisance ou de sport sont tenues de contribuer ou de pourvoir au recyclage et au traitement des déchets issus de ces produits ». [LEGIFRANCE]

En septembre 2021, l'APER compte 26 centres agréés de déconstruction :

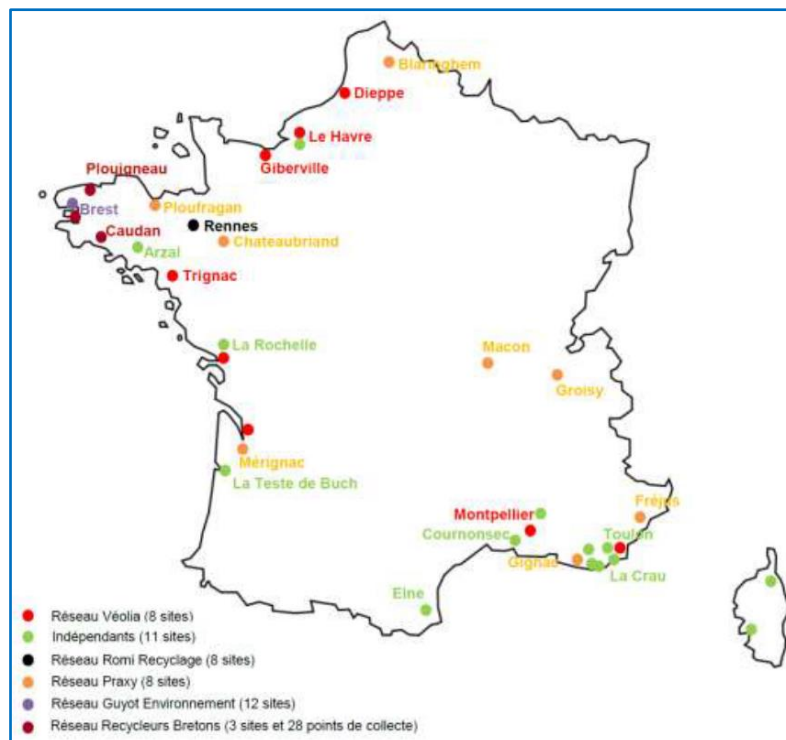


Figure 11 : Centres agréés APER – Source : APER



Par exemple, le groupe Sclavo Environnement basé à Fréjus travaille en partenariat avec l'APER dans la déconstruction des bateaux. Ils appliquent les étapes suivantes dans la déconstruction des bateaux :



Figure 12 : Les étapes de déconstruction d'un bateau [SCLAVO]

C'est ainsi qu'en 2015, 515 bateaux ont été déconstruits par le réseau APER et de fin août 2019 à fin septembre 2021, 3 116 déconstructions ont été réalisées.

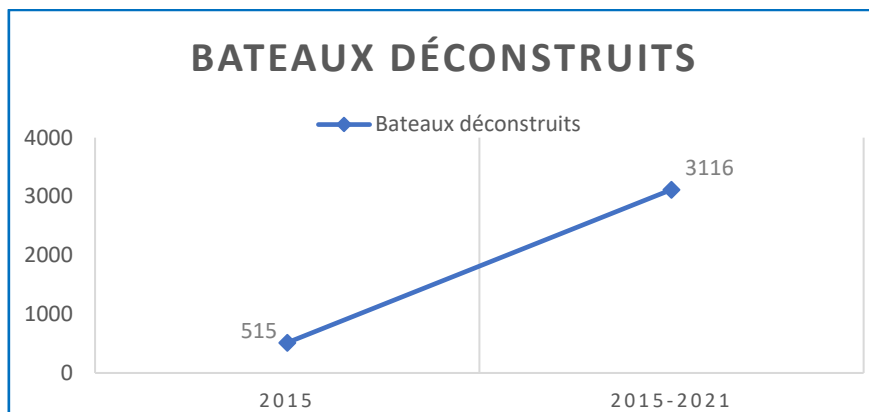


Figure 13 : Evolution du nombre de bateaux déconstruits entre 2015 et 2021

Parmi les déconstructions, on retrouve en grande partie des voiliers et des bateaux à moteurs. Le graphe suivant décrit la répartition globale des bateaux déconstruits.

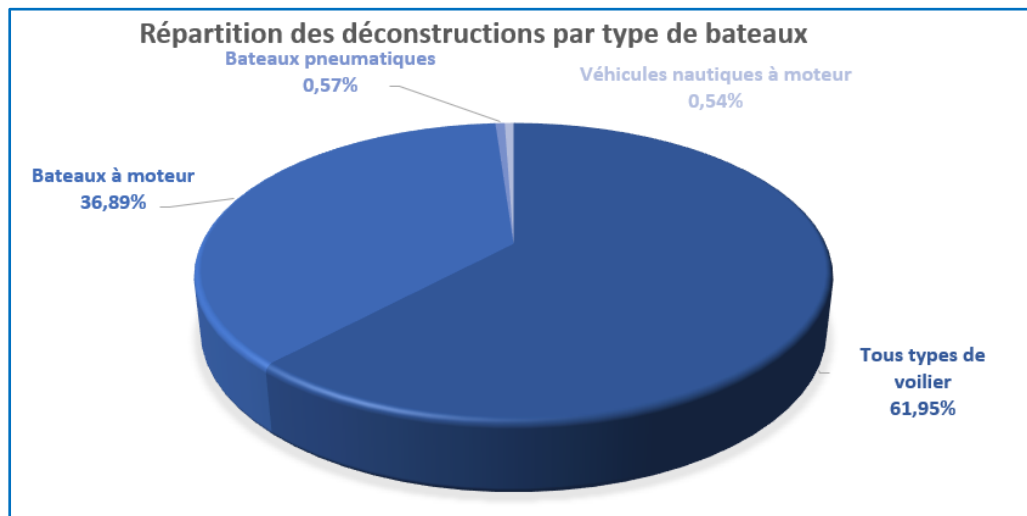


Figure 14 : Répartition des déconstructions par type de bateau [APER]

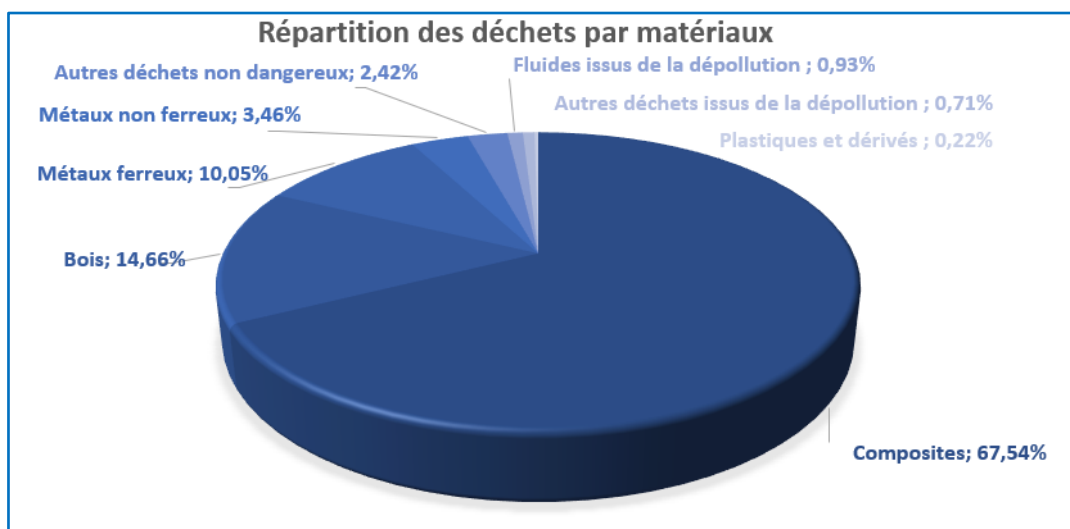


Figure 15 : Répartition des déchets par matériaux [APER]

La prise en charge de la déconstruction des bateaux sous l'impulsion de l'APER est une grande avancée pour la création de la filière, toutefois, certaines entreprises pratiquaient déjà la déconstruction avant la création de l'APER. En effet, le réseau APER est composé d'une cinquantaine de sites de déconstruction et le réseau hors APER est composé d'une quarantaine de sites. Pour répondre à la principale problématique de ce feasibility study, nous nous attacherons à rechercher de potentielles filières de recyclage et de valorisation à grande échelle pour les matériaux composants les voiliers.

Malgré une durée de vie 2 à 4 fois supérieure à celle d'une voiture, un bateau de plaisance n'est pas éternel. Chaque année, des centaines de bateaux arrivent en bout de course et nécessitent une prise en charge pour être retirés proprement du marché, dans le respect de l'environnement et de la réglementation.

#### Un bateau est considéré en fin de vie lorsque :

- ▼ Il n'est plus réparable et navigable,
- ▼ Les frais de remise en état sont trop élevés par rapport à sa valeur résiduelle sur le marché et à sa remise en conformité (sécurisation).

Ce sont généralement des bateaux qui n'intéressent plus personne : obsolètes, parfois mal réparés, sans respect des règles de l'art et potentiellement dangereux pour leurs utilisateurs. Leur sortie du marché de l'occasion s'impose comme une évidence !

#### Confier son vieux bateau à l'APER est une solution gratuite qui n'apporte que des bénéfices :

- ▼ Arrêter de payer une place de port, un emplacement en gardiennage, pour un bateau qui n'est plus utilisé,
- ▼ Libérer et sécuriser le domaine public,
- ▼ Gagner de la place dans son jardin, son garage, son hangar,
- ▼ Préserver les rives, rivages, plages et littoraux en supprimant une pollution visuelle,
- ▼ Éviter que son bateau se délabre et présente un risque pour l'environnement et la sécurité.



Devenir propriétaire d'un bateau de plaisance impose d'en être responsable tout au long de son utilisation, jusqu'à sa fin de vie.

Figure 16 : APER, fin de vie d'un bateau

#### Données de l'APER :

- Environ 80% des bateaux de plaisance ont été construits avant les années 2000, avec une durée de vie de 30 à 40 ans en moyenne.
- 65 000 bateaux changent de propriétaire chaque année [MINISTÈRE]
- 72% des déchets issus de la déconstruction des bateaux confiés à l'APER sont valorisés (recyclage, valorisation énergétique, réemploi...)
- Environ 10 000 nouvelles immatriculations de navires neufs et navires d'occasion par an (mis en service pour la première fois en France) [MINISTÈRE]
- En 2020, 98% des bateaux déconstruits se situaient à moins de 150km d'un des centres de déconstruction agréés

La Provence Alpes Côtes d'Azur est composée de 147 ports de plaisance et de pêche sur le littoral pour environ 60 000 places, soit près d'un tiers des emplacements nationaux. Ce qui en fait la première région de France en termes de capacité d'accueil pour la plaisance et une des principales zones de navigation au monde pour les yachts. [NAUTISME]

1.1 - Immatriculations délivrées en métropole au 31/08/2020

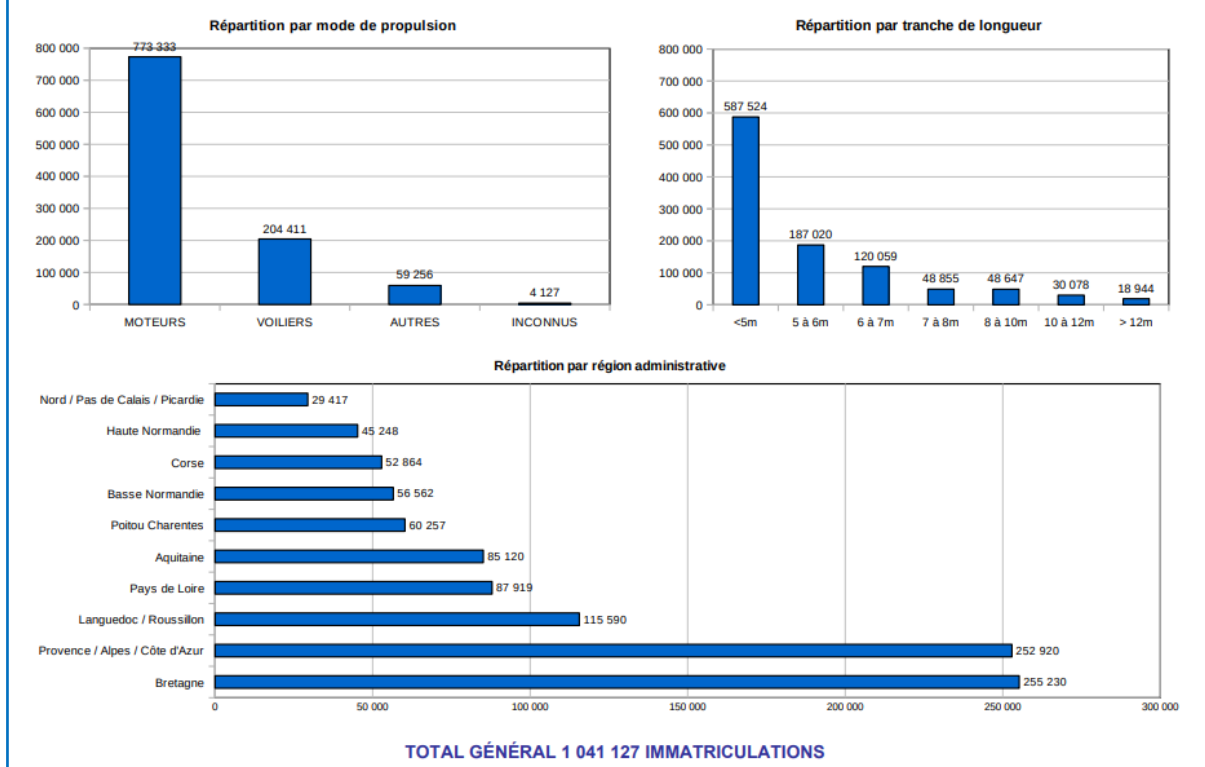


Figure 17 : Immatriculations délivrées en métropole au 31/08/2020. [GOUV]



### III. Les matériaux d'un voilier type

#### A. Exemple de voilier type : le J80

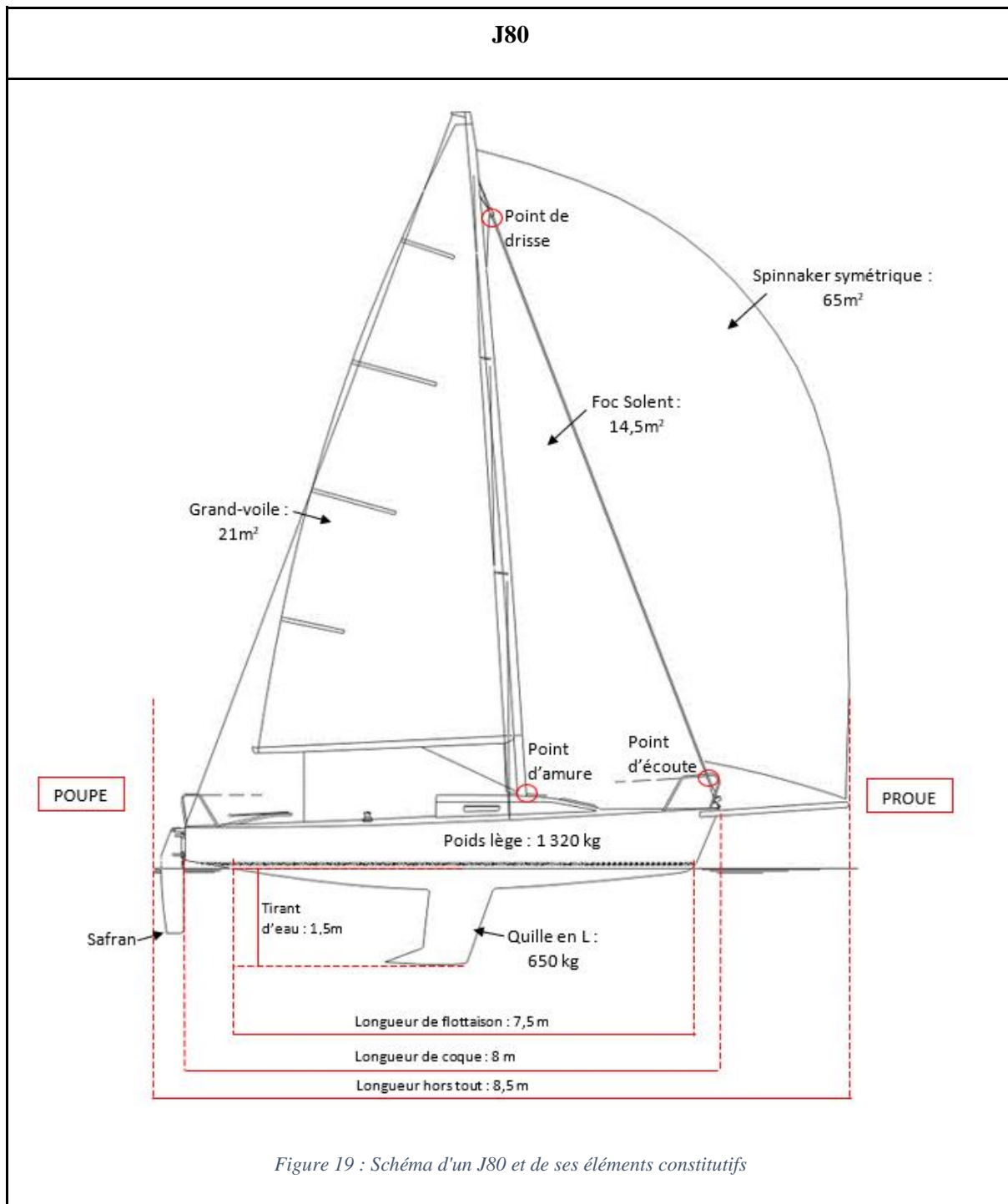
Les voiliers destinés à la régates sont fabriqués par Jeanneau, Bénéteau, Dufour etc. Les modèles de voiliers les plus populaires sont le Catalina 22, le First 210 ou encore le Foalkboat.

Le modèle de voilier de régates J80 conçu par Rod Johnstone et lancé en 1992 a été vendu à plus de 1590 exemplaires dans le monde. Il s'agit d'un des bateaux de sport les plus vendus en Europe et en Amérique du Nord et le plus répandu sur les plans d'eau français. Il fait preuve d'une grande notoriété dans le monde entier.

C'est pourquoi notre étude de cas porte sur ce modèle spécifique de bateau populaire notamment pour la régates. Il peut accueillir 2 à 4 personnes à son bord. Ce voilier, d'une longueur de coque de 8,5m et d'une largeur de 2,5m est également accompagné d'un moteur. La coque est composée de matériaux composites en panneaux sandwichs. [LESREGATES.COM]



Figure 18 : Photo d'un voilier J80 en mer



<b>Fabricant</b>	Jcomposites
<b>Année de lancement</b>	1992
<b>Architecte naval</b>	Rod Johnstone
<b>Type de coque</b>	Monocoque
<b>Bau maximum</b>	2,49 m
<b>Dimensions voiles</b>	Surface du tourmentin : 3 m <sup>2</sup> Surface du génois : 20,2 m <sup>2</sup>

	Allures : Surface de voile au près : 41,2 m <sup>2</sup> Surface de voile au portant : 86 m <sup>2</sup>
<b>Type de mât</b>	Mât implanté sur la quille, non rotatif
<b>Eléments de manoeuvre</b>	Barre franche
<b>Jauge du J80</b>	3,83 Tx
<b>Type de gréement</b>	Sloop marconi 9/10
<b>Catégorie de conception CE</b>	B ( <i>La catégorie de conception CE indique la capacité à affronter de certaines conditions météo (le voilier est conçu pour ces conditions)</i> A : Vent < force 9, Vague < 10m B : Vent < force 8, Vague < 8m C : Vent < force 6, Vague < 4m D : Vent < force 4, Vague < 0,5m)
<b>Matériaux</b>	
<b>Coque et pont</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- En panneau sandwich avec l'âme en balsa faible et la peau en polyester renforcée de fibre de verre</li> <li>- Résine vinylester et gelcoat pour une meilleure garantie contre l'osmose</li> <li>- Retour de coque formant un puisard de grande capacité.</li> <li>- Safran suspendu en stratifié de polyester renforcé sur tableau arrière</li> <li>- Ferrures, visserie, boulonnerie en acier inoxydable au molybdène ou alliage léger anodisé</li> </ul>
<b>Voiles</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Spinnaker : généralement en nylon</li> <li>- Tourmentin : foc de tempête, le plus petit foc d'un voilier, réalisé en tissu très épais pour résister aux intempéries. Tissu épais d'environ 365 g/m<sup>2</sup>.</li> </ul>
<b>Mât</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le mât est implanté sur une structure aluminium reprise sur la cloison principale</li> <li>- Mât et bôme en alliage léger anodisé</li> <li>- Bout-dehors en carbone</li> </ul>
<b>Pont</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aménagements contre-moulés avec plancher en bois rainé anti-dérapant 2 tons en gelcoat dans le moule</li> <li>- Balcons avant et arrières en inox</li> <li>- Cadène d'étai inox</li> <li>- Panneau coulissant polyester</li> <li>- Porte d'entrée plexiglas</li> </ul>
<b>Quille</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lest avec bulbe en plomb protégé par traitement époxy, fixé par boulons inox et stratifié sur retour de coque</li> </ul>

[J80]

## B. Les matériaux utilisés pour la construction des coques

Les coques des voiliers sont souvent constituées de panneaux sandwich composés de polyester, de fibre de verre, de résine composite, de balsa, de carbone... Par exemple, la coque du J80 est composée de panneau sandwich de balsa et de polyester en fibre de verre.

### 1. Les coques en panneaux sandwich

On appelle panneau sandwich, un certain type d'assemblage de matériaux utilisé dans le but de réduire le poids du bateau pour obtenir davantage de rigidité. Le panneau sandwich est composé d'un matériau isolant, placé au niveau de l'âme, entre deux peaux en fibre.

#### a) Le principe du panneau sandwich

Lorsque l'on plie un panneau sandwich, les deux peaux vont être soumises à des forces opposées, l'une travaille en traction (celle du dessus sur le schéma) et l'autre en compression. Plus les peaux sont éloignées par l'augmentation de l'épaisseur de l'âme, plus la rigidité de la plaque est grande. Le tout, sans avoir à épaissir les peaux, donc sans ajouter de poids car l'âme est composée d'un matériau très léger.

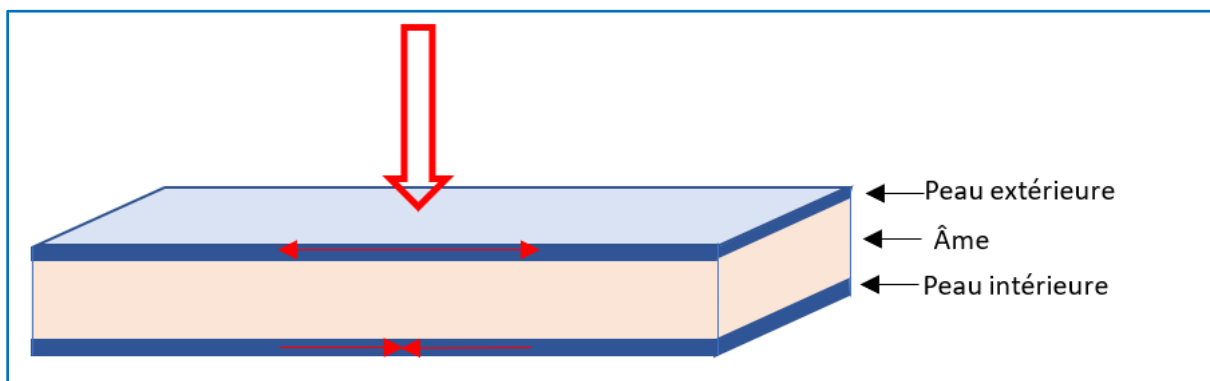


Figure 20 : Le principe du panneau sandwich

Les peaux intérieures et extérieures sont un empilement de couches de tissus en fibre et résine composite, telles que le polyester, le vinylester ou l'époxy.



L'âme doit être composée d'un matériau le plus léger possible, comme de la mousse (PVC, Corecell...), le balsa de construction ou en nid d'abeilles.

#### b) Les matériaux constituant l'âme


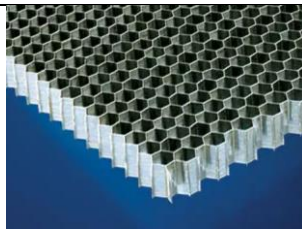

La *mousse PVC* : elle offre un bon rapport rigidité/poids, est résistante aux compressions, n'absorbe pas l'eau et c'est un matériau optimal en tant qu'isolant thermique.



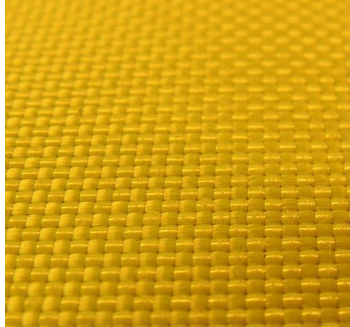
Figure 21 : Mousse PVC

<p>La mousse Corecell : cette mousse est très solide et résistante à la propagation des fissures. Elle peut s'allonger jusqu'à 65% sous une force de cisaillement avant défaillance, ce qui rend pratiquement impossible une rupture de l'âme par cisaillement. Elle résiste aux produits chimiques et en compression.</p>	 <p>Figure 22 : Mousse Corecell</p>
<p>Le balsa : issu d'une espèce d'arbre originaire des Antilles pouvant atteindre 40m, le balsa désigne le bois de cet arbre très léger et cassant. Il est deux fois plus léger que le liège avec une densité de 140 kg/m<sup>3</sup>. Cette essence de bois a une forte capacité à supporter la compression, il est résistant et apporte une bonne isolation thermique et acoustique, il résiste au feu et aux produits chimiques (tel que le styrène). Son prix abordable en fait une ressource naturelle renouvelable idéale, mais notons tout de même qu'il provient des Antilles.</p>	 <p>Figure 23 : Balsa</p>

Le nid d'abeille est composé de différents matériaux :

<p>Aluminium : il s'agit d'un métal très léger, résistant à la corrosion, il n'est pas isolant thermique mais il est un bon conducteur électrique. Il peut être facilement travaillé et déformé à basse température, il peut se déformer sans se rompre. Il est recyclable à 100% sans dégradation de ses propriétés et cela nécessite peu d'énergie.</p>	 <p>Figure 24 : Aluminium</p>
<p>Acier inoxydable : cet alliage à base de fer et de carbone possède une bonne résistance au feu, il ne dégage aucune fumée toxique, il est inaltérable et recyclable.</p>	 <p>Figure 25 : Acier inoxydable</p>
<p>Polypropylène : C'est un matériau léger (structure creuse), non toxique, imperméable, antichoc, à longue durée de vie, résistant au feu, à la corrosion et à l'humidité, isolant thermique et anti-moisissure. Il a une grande résistance aux agents chimiques.</p>	 <p>Figure 26 : Polypropylène</p>



<p>Fibre d'aramide : il s'agit d'une fibre chimique synthétique provenant de polymères thermoplastiques d'origine pétrochimique. La fibre d'aramide est très légère, a de bonnes propriétés mécaniques et thermiques, elle est résistante à la corrosion, a une faible densité (32kg/m<sup>3</sup>) et présente une longue durée de conservation.</p> <p>Par exemple, le Kevlar® et le Nomex® sont fabriqués à partir d'aramide. Cette matière n'est pas écologique car son procédé de fabrication énergivore implique l'utilisation de solvants et d'acides chimiques. Il existe très peu d'informations disponibles quant à la toxicité de cette matière. Elle expose potentiellement les employés lors de la production et la transformation de la fibre, à un empoussièrment contenant des fibrilles respirables toxiques, voire cancérogènes. [THEGOODGOODS]</p>	
<p>Figure 27 : Fibre d'aramide</p>	

Les peaux constituant les panneaux sandwich sont souvent composées de résines composites. Nous détaillons ci-dessous leur composition.

## 2. Les coques en résine composite

### a) Les constituants

La résine composite est formée de l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux non miscibles dont les propriétés se complètent. Ce matériau a une grande résistance à la fatigue et un faible taux de vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur et de la corrosion.

Les matériaux composites sont constitués d'une matrice, d'un renfort et de charges ou d'additifs. La matrice lie et transmet les contraintes au renfort. Dans le cadre de notre étude des coques de voiliers, la matrice est therm durcissable et très souvent composée de polyester, le renfort est composé de fibre de verre ou de fibre de carbone. Des charges, sous forme de poudre ou de liquide, peuvent être ajoutées pour améliorer les propriétés de la résine, notamment la tenue aux UV ou la résistance aux chocs.

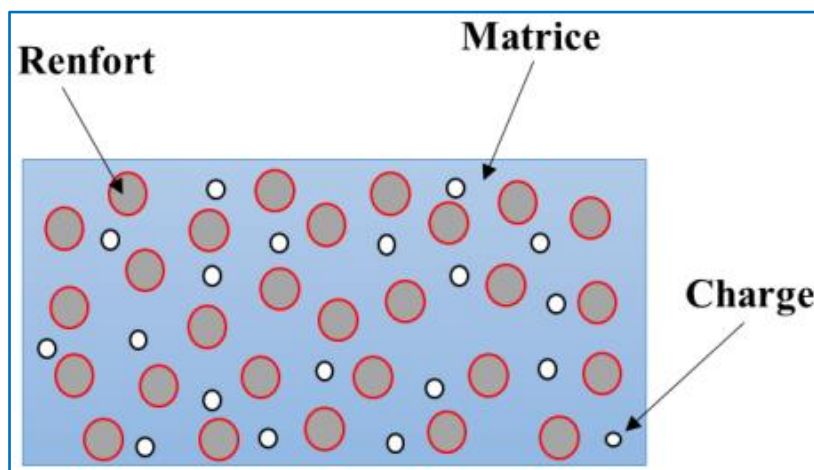







Figure 28 : Schéma de la composition de la résine composite. [NOUIGUES]

(1) La matrice

Il existe deux catégories de matrices qui ont des propriétés différentes :

<p>Les résines <b>thermodurcissables</b> :</p> <p>Sous l'action de la chaleur cette résine se durcit progressivement pour atteindre un état solide irréversible. Elles ne peuvent pas être recyclées, on retrouve par exemple les résines en polyester et les résines époxydes.</p>	
<p>Les résines polyesters insaturées sont les plus courantes dans les résines composites, elles sont peu couteuses et durcissent rapidement.</p>	 <p>Figure 29 : Résine polyester</p>
<p>Les résines époxydes ne représentent que 5% du marché des composites à cause de leur prix élevé. Elles ont de bonnes propriétés mécaniques en traction, en flexion, en compression et face aux chocs ainsi qu'une bonne tenue à des températures élevées. Toutefois, elles sont sensibles à la fissuration.</p>	 <p>Figure 30 : Résine époxyde</p>
<p>Les résines <b>thermoplastiques</b> :</p> <p>Elles ont la propriété de se ramollir lorsqu'elles sont chauffées à une certaine température, puis deviennent dures lorsqu'elles se refroidissent. Ces résines présentent donc une réversibilité, cela rend le matériau recyclable à condition que la matière ne soit pas thermiquement dégradée et que les contraintes mécaniques de cisaillement de l'éventuel procédé de mise en forme ne modifient pas la structure moléculaire. On retrouve par exemple le polychlorure de vinyle (PVC), le polyéthylène (PE) et le polypropylène (PP).</p>	
<p>Le polychlorure de vinyle (PVC),</p>	 <p>Figure 31 : PVC</p>
<p>Le polyéthylène (PE)</p>	 <p>Figure 32 : PE</p>
<p>Le polypropylène (PP).</p>	 <p>Figure 33 : PP</p>

## (2) Le renfort

Les renforts sont constitués de fibres de différentes tailles qui améliorent les propriétés du matériau composite comme la résistance au feu ou à l'abrasion par exemple. Il doit être compatible avec la résine de la matrice utilisée et dépend de son utilisation. Les renforts peuvent être de type organique (le kevlar), minéral (verre ou carbone), métallique (alumine), végétal (chanvre, lin) et ont des formes (particules ou fibreux) et des tailles différentes (courtes ou longues, unidirectionnelles ou tissées). Plus la fibre du renfort est longue, plus elle est résistante.

Chaque fibre utilisée possède des propriétés différentes : les fibres les plus utilisées dans les coques de bateau sont la fibre de verre et la fibre de carbone.

La fibre de verre :

Elle est composée de plusieurs filaments de verre textile de petit diamètre. Ces filaments sont très sensibles à l'abrasion, ils sont donc enduits d'un produit qui les protège une fois conçus, qui les cohésionne entre eux et qui favorise leur liaison à la résine.

La fibre de verre a de bonnes caractéristiques mécaniques et un faible coût, c'est donc une bonne alternative pour disposer d'un très bon rapport qualité/prix. C'est pourquoi la fibre de verre est le renfort le plus employé dans les matériaux composites.

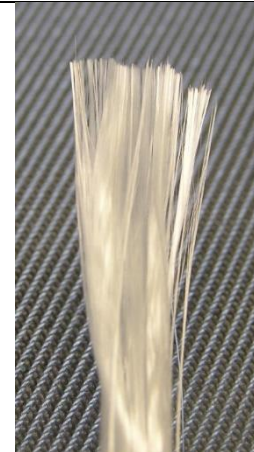


Figure 34 : Fibre de verre

La fibre de carbone :

La fibre de carbone propose une bonne résistance à la traction et à la compression ainsi qu'une bonne flexibilité pour une faible densité. C'est donc une bonne alternative lorsque l'on cherche à alléger le matériau composite.

La fibre de carbone est présente sous deux formes :

- La forme linéique
- La forme tissu ou surfacique, ce type de structure est utilisé pour des pièces de types plaque ou coque

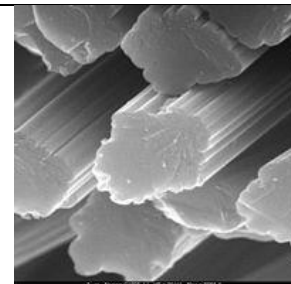


Figure 35 : Fibre de carbone



Figure 36 : Tissu de carbone



b) La mise en œuvre

Il existe plusieurs techniques de mise en œuvre des matériaux composites constituant les coques de bateau : le *moulage au contact*, le *moulage par projection simultanée*, le *moulage par injection basse pression* et le *moulage par infusion*.

Certaines de ces méthodes font appel à du *gelcoat*. Il s'agit d'un matériau à base de résine synthétique utilisé pour la finition et la protection des coques de bateau en résine composite. En effet, suivant sa composition et sa destination, il protège des rayons UV, des rayures et de l'humidité. Il a ainsi pour rôle d'étanchéifier la coque et de la protéger. Les gelcoat les plus utilisés sont à base d'époxyde ou de polyester insaturé. La précision de son application est importante. En effet, son épaisseur doit être comprise entre 0,7mm et 0,9mm. Si ce n'est pas assez épais, il y a un manque d'étanchéité, si c'est trop épais, le gelcoat devient cassant et perd de sa souplesse. [BOURGUINAT]

(1) Le moulage au contact

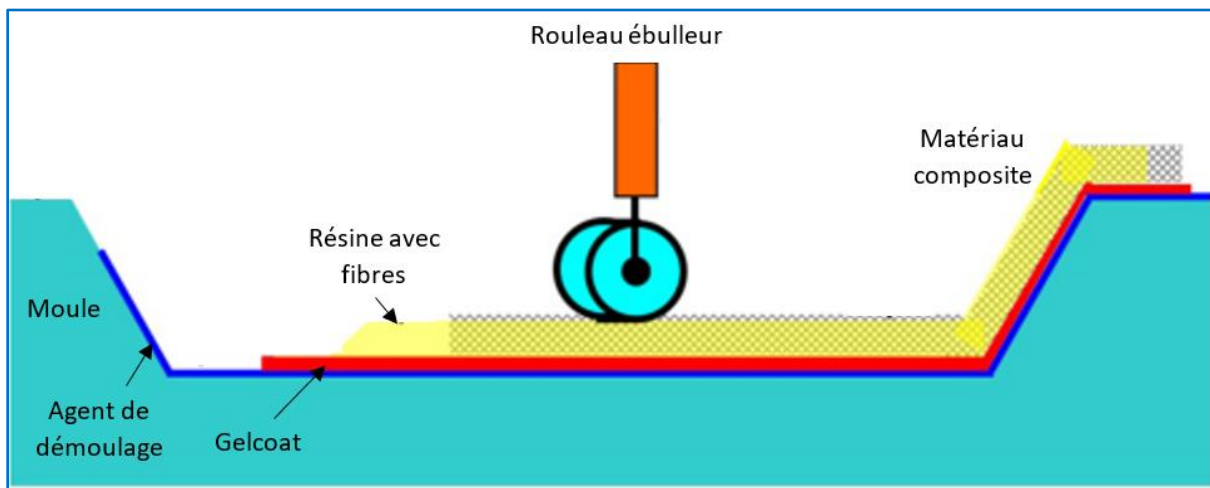


Figure 37 : Schéma du moulage au contact. [WIKIPEDIA]

Ce procédé est entièrement manuel, il se déroule à température ambiante et sans mise en pression. Tout d'abord, il y a un nettoyage, un cirage et un lustrage du moule pour un meilleur rendu final. Par la suite, est posée une couche de gelcoat, puis de la résine est appliquée à l'aide d'un pinceau spécifique sur une bande de tissu de verre jusqu'à l'imprégnation complète des fibres de verre. Le rouleau ébulleur sert à extraire l'air. Le procédé est répété jusqu'à l'obtention de l'épaisseur souhaitée. Une fois la résine durcie, la coque est démoulée. C'est une méthode facile et peu coûteuse. Toutefois, elle ne permet pas la création de grandes séries du fait du facteur humain qui limite la cadence de production.

(2) Le moulage par projection instantanée

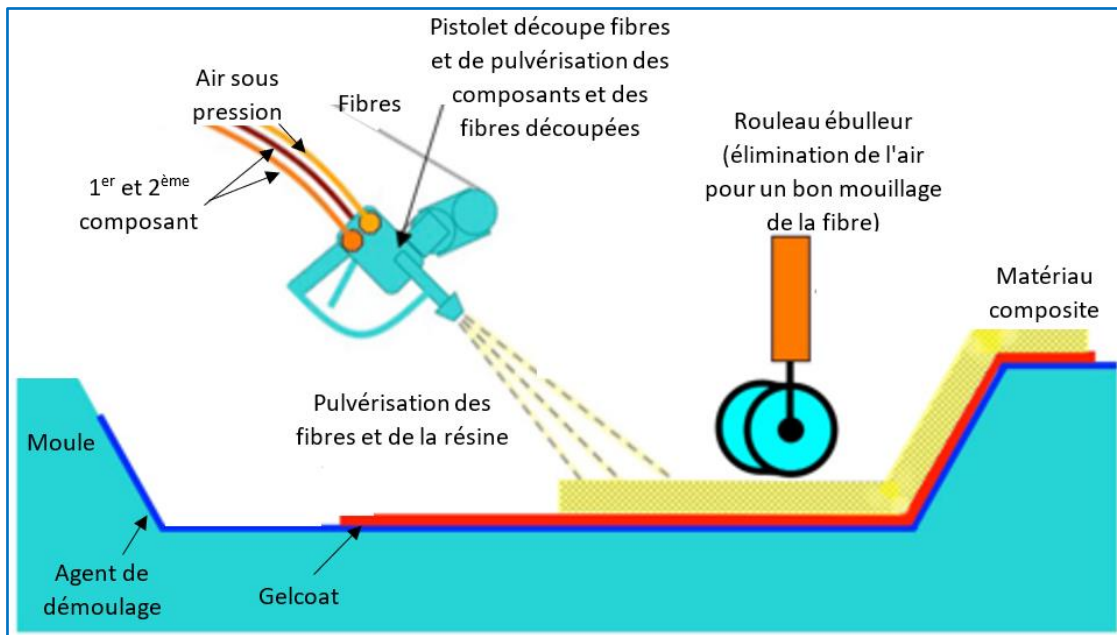


Figure 38 : Schéma du moulage par projection simultanée. [THEGOODGOODS]

Le moulage par projection simultanée est propice à la création de grandes pièces comme les coques de bateau. Lors de ce procédé, il s'agit d'enduire le moule avec un agent démoulant, puis de déposer le gelcoat. Ensuite, de la fibre découpée et de la résine sont projetées simultanément à l'aide d'un pistolet à air comprimé. Pour que le tout imprègne correctement, le rouleau ébulleur est passé manuellement, ce processus permet d'enlever les bulles. La projection a lieu jusqu'à ce que l'épaisseur souhaitée soit atteinte. La résine étant thermodurcissable, elle durcit à température ambiante puis le démoulage de la pièce peut être effectué. Cette technique est un gain de temps comparé à la méthode de moulage au contact.

(3) Le moulage par injection basse pression

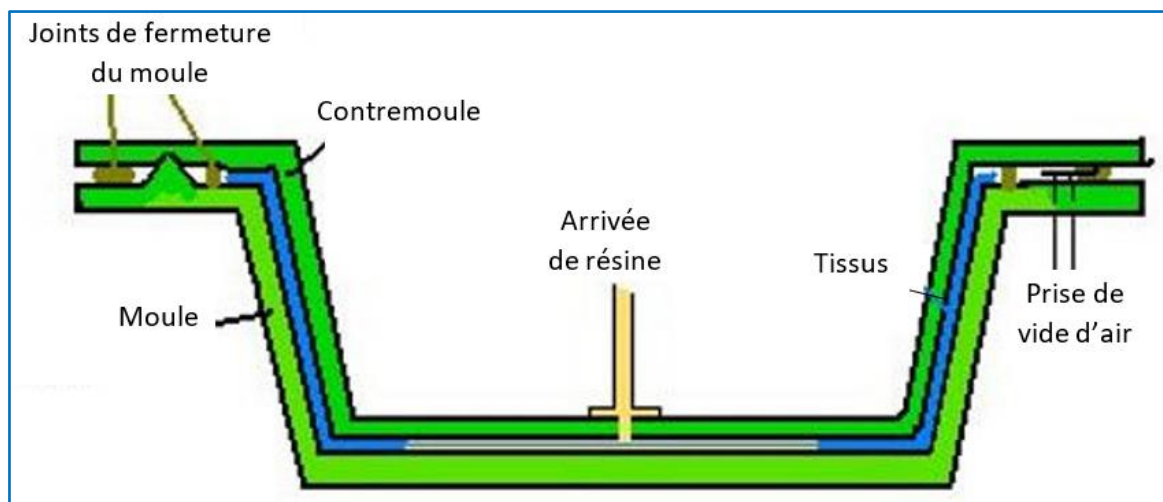


Figure 39 : Schéma du moulage par injection basse pression. [OUESTCOMPOSITES]

Dans ce procédé les finitions sont très bien exécutées puisque deux moules sont utilisés. On positionne entre les deux moules les renforts en fibre de verre, puis la résine est injectée sous pression. L'air et le trop plein de résine s'échappent par des trous dans les moules sous l'effet de la pression.

Toutefois, cette méthode reste coûteuse car en effet, deux moules sont utilisés. C'est pourquoi elle est généralement utilisée pour les petites pièces.

#### (4) Le moulage par infusion

Dans les années 60'/70', la technique de moulage la plus utilisée était le moulage au contact. Cependant, il en a résulté un problème d'étanchéité, appelé *osmose*. Le risque lié à l'osmose est avéré pour les bateaux en polyester. Il s'agit d'un phénomène physico-chimique dû au vieillissement du polyester et qui se produit lorsque le gelcoat perd de son étanchéité. Cela provoque une pénétration de l'eau dans les tissus de verre, ce qui détruit leur rigidité. [OSMOSE]

Ainsi est apparue une technique plus innovante : le moulage par infusion sous vide.

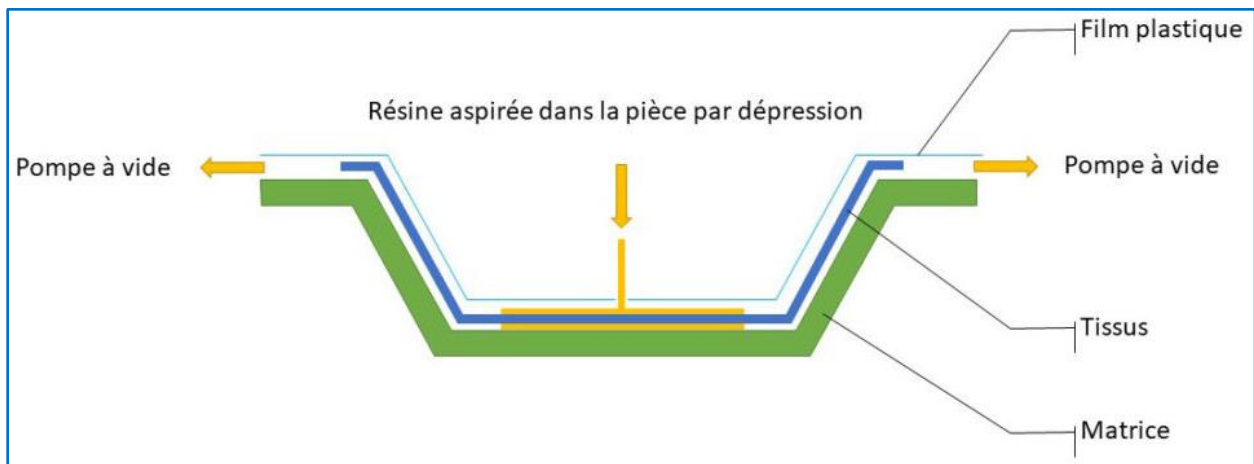


Figure 40 : Schéma du moulage par infusion [NOUIGUES]

Ce procédé innovant consiste à imprégner une pièce en composite en aspirant la résine par la mise sous vide de la pièce. L'étanchéité est assurée par une bâche en plastique qui vient se plaquer au plus près de la pièce, réduisant ainsi l'espace entre le moule et l'enceinte, ce qui limite la quantité de résine utilisée. L'infusion améliore la résistance des composites et permet de réduire le poids de la coque, ainsi de réduire la consommation de carburant.

### 3. Avantages et inconvénients du panneau sandwich

Un des principaux avantages de ce type d'assemblage reste son faible poids qui permet d'améliorer les performances du voilier et de réduire sa consommation en carburant. Le panneau sandwich présente également une grande rigidité et de bonnes isolations thermique et phonique en fonction du matériau constituant l'âme. Cependant il peut présenter des faiblesses au poinçonnage (c'est-à-dire à la perforation) et aux infiltrations qui apportent des risques de délaminage.

Le délaminage se présente comme une désolidarisation du matériau par ouverture, cisaillement ou glissement :

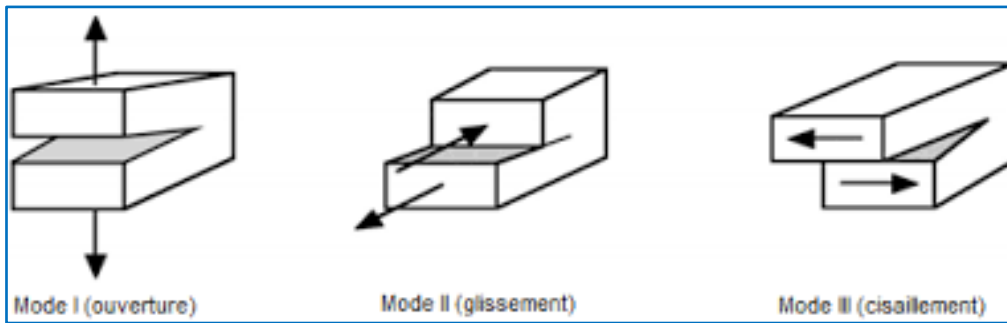


Figure 41 : Schémas du délaminage

Un autre principal inconvénient est l'aspect non recyclable des coques en panneau sandwich, en effet, le mélange de matériaux composite ne permet pas de les recycler. A ce jour, même si des méthodes sont en test, il n'y a pas de technique développée pour séparer les fibres du renfort et la résine de la matrice.

## C. Les voiles

Historiquement, ce sont les fibres naturelles, telles que le lin ou le coton, qui sont utilisées pour faire les voiles. Cependant, ces dernières avaient des inconvénients tels que le poids, la sensibilité aux moisissures, la sensibilité aux UV etc... C'est dans les années 50' que les fibres synthétiques font leur apparition comme le nylon, le carbone, le polyéthylène ou encore le polyester.

Pour coupler certaines caractéristiques en fonction de l'utilisation, certaines voiles peuvent être laminées. Le polyester emprisonne les fibres : en fonction des fibres choisies, on va gagner en poids, en résistance etc...

Nous allons évoquer plus bas les matériaux les plus couramment utilisés ainsi que leurs caractéristiques [SILVYA] :

- Le Nylon : utilisé pour les spis.
  - Il est léger, résistant à la rupture et flexible.
  - Peu résistant aux UV et aux agents chimiques, il est sensible aux moisissures.
  - Sa durée de vie est très variable car elle dépend vraiment de l'usage
  - L'impact sur l'environnement est fort car c'est un polyamide dérivé du pétrole.
  - Utilisation : très utilisé dans le textile et pour les pièces mécaniques dans l'industrie automobile, il peut être moulé à chaud.
  - Fin de vie : on peut déjà recycler des pneus et en faire des fibres de nylon. Cela existe également dans l'industrie textile avec Patagonia par exemple qui propose une gamme en nylon recyclé.
  - Alternative : pour fabriquer les voiles, les alternatives possibles sont les fibres naturelles car les autres fibres synthétiques sont également majoritairement issues du pétrole.

*Par exemple :*

- *Recyclage en textile : Patagonia [PATAGONIA]*
- *Recyclage des pneus [RECYCLAGEDUNYLON]*
- Le Kevlar (type d'aramide le plus répandu) :
  - Utilisé majoritairement pour les voiles de compétition
  - Fibre résistante et rigide
  - Inconvénient : faible résistance aux UV donc une durée de vie plus courte, il est également très sensible au pliage
  - Utilisation : gilet pare-balles, montures de lunettes, hifi téléphonie et musique
  - Fin de vie et recyclage : malheureusement en France, le recyclage de ce matériau est peu développé. Il l'est beaucoup plus aux USA et au Canada : BrentIndustries (Kevlar recyclé pour un usage industriel) ou encore Harmony recycling.
  - Réemploi : en France, il existe une solution locale pour les aramides de manière générale : l'idée d'un pompier était d'utiliser leurs tenues usagées pour en faire des panneaux isolants. La grande résistance au feu est l'avantage majeur. [GARIN]
- Le Polyester :
  - Un des matériaux les plus répandus de manière générale car il est peu coûteux.
  - Avantages : Peu coûteux, résistance aux UV, à l'abrasion et au pliage donc durabilité importante.
  - L'impact sur l'environnement est fort car comme pour le nylon, c'est un sous-produit du pétrole.
  - Utilisation : très majoritaire dans le monde du textile (représente 70% des fibres textiles utilisées dans le monde.) Sinon, le polyester insaturé est une résine très répandue pour la fabrication de matériaux composites.

- Fin de vie et recyclage : sa forte présence dans notre quotidien et l'urgence écologique actuelle pousse les marques de textile à utiliser du polyester recyclé.
- Procédé de recyclage : transformation de l'ancien polyester en granulés qui sont ensuite fondus. Cela va donner des filaments qui seront assemblés pour donner des fils. Ils peuvent ainsi être retravaillés.
- Inconvénients au recyclage : il peut être partiel si le polyester est assemblé à d'autres fibres telles que le coton. Le recyclage n'est pas infini. Le polyester reste également un sous-produit du pétrole et pollue énormément au long de son cycle de vie.
- Le Polyéthylène (pour les grandes unités de croisière) :
  - Utilisation : constitue typiquement la matière plastique que nous connaissons et côtoyons au quotidien (1/3 des plastiques et 1/2 des emballages dans le monde) : flacon dur (HDPE) ou souple (LDPE), gaines de câbles électriques (PER), matériel de sport comme ski, snowboard, surf, moto (Dyneema) mais son coût est supérieur à d'autres polyéthylène.
  - Inconvénient : Nocif pour l'environnement car sa combustion dégage des gaz toxiques ainsi que du CO<sub>2</sub>.
  - Ecoconception : il peut aussi être produit à partir de ressources renouvelables. Le polyéthylène vert est issu d'éthylène d'éthanol lui-même issu de la canne à sucre.
  - Fin de vie : matériau très stable qui ne se dégrade pas dans la nature même si certains procédés permettent de le biodégrader partiellement mais cette pratique est loin d'être généralisée.
- Le Carbone (utilisé pour la régate) :
  - Avantages : grande résistance, il n'est pas sensible aux UV, faible élasticité
  - Inconvénient : moins solide que les fibres d'aramides par exemple.
  - Fin de vie : aujourd'hui, les produits à base de carbone sont enfouis et pourtant non biodégradables
  - Recyclage : l'association Recycling Carbon forme et sensibilise pour un meilleur usage du carbone.
  - Utilisation : les plus gros secteurs sont l'aéronautique, l'automobile et ensuite l'éolien.

## D. Les mâts

Les mâts sont faits la plupart du temps en aluminium, excepté les voiliers de courses qui peuvent être conçus avec des matériaux composites ou du carbone pour plus de légèreté.

Nous allons nous concentrer sur l'aluminium :

- Avantages : assez léger, résistant
- Inconvénients : impact écologique important avec l'extraction : le minerai principal est la bauxite et son extraction provoque des désastres écologiques.
- Recyclage : il est possible de recycler à 100% l'aluminium et de le réutiliser presque à l'infini sans qu'il perde de propriétés.
- Fin de vie : le prix de rachat de l'aluminium ne cesse d'augmenter ces dernières années, il est donc intéressant de le faire recycler
- Exutoire : pour le moment, même si l'aluminium se recycle très facilement, tous les centres de tri ou de traitement des déchets ne sont pas équipés de la machine à courant de Foucault (elle permet de séparer les métaux non ferreux des autres matières.)

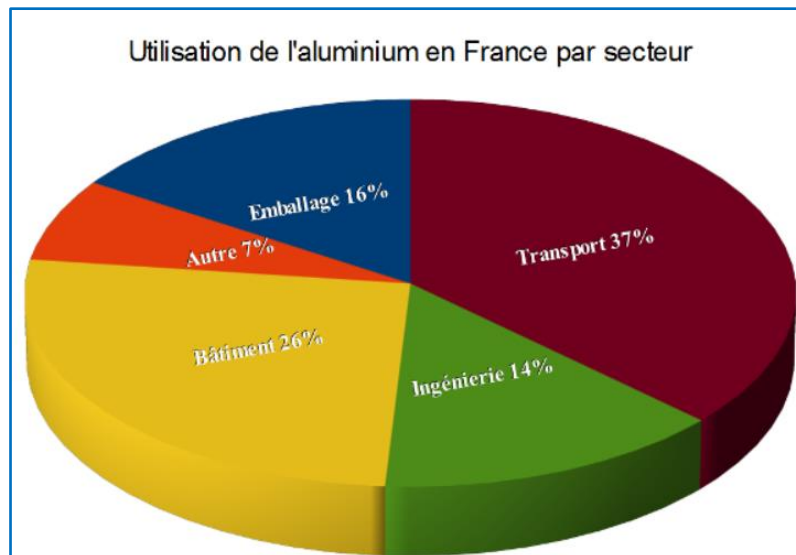


Figure 42 : Utilisation de l'aluminium en France par secteur

### E. Les cordes

Caractéristiques	Polyester	Dyneema	Kevlar	Polyester	Polyamide	Polypropylène	Chanvre
Utilisation	Drisse et écoute	Drisse ou écoute	Drisse et sur-gainage des drisses et écoutes	Amarre	Amarre, ligne de mouillage ou garcette	Amarre ou multi-usages	Décoration
Résistance à l'allongement	3	4	5	3	5	2	2
Allongement à la rupture	3	4	5	3	5	2	2
Résistance aux UV	4	3	2	4	3	2	3
Résistance à l'eau de mer	5	4	2	5	3	3	3
Performances	3	5	4	5	4	3	—
Longévité	5	4	2	5	4	3	4
Prix	Très attractif	Attractif	Élevé	Très attractif	Attractif	Très raisonnable	Attractif

Figure 43 : Répartition des caractéristiques des cordes selon le matériau. [CORDAGE]

Comme nous pouvons le voir, les différents matériaux utilisés pour le cordage sont très similaires à ceux qui sont utilisés pour les voiles.

Ce sont des fibres synthétiques mais historiquement, tout comme la voile, d'autres matériaux étaient utilisés comme le cuir, le crin ou les boyaux. Pour la fibre végétale, le coton, la fibre de coco, le sisal ou encore le chanvre étaient privilégiés.

L'arrivée des fibres synthétiques est plus économique. En fonction de la fibre choisie, elle permet de s'adapter aux différents usages sur le bateau.



## F. La quille

La quille permet de maintenir le bateau en équilibre et a également une fonction de dérive. Elle est donc très importante mais tous les bateaux ne possèdent pas de quille comme les catamarans ou les trimarans par exemple.

Nous nous y intéressons car elle représente un volume de matière important dans le bateau.

En termes de matériaux, nous retrouvons des matériaux similaires à la coque comme la fibre de verre, aluminium ou bois. Le ballast qui œuvre pour la stabilité est en plomb.

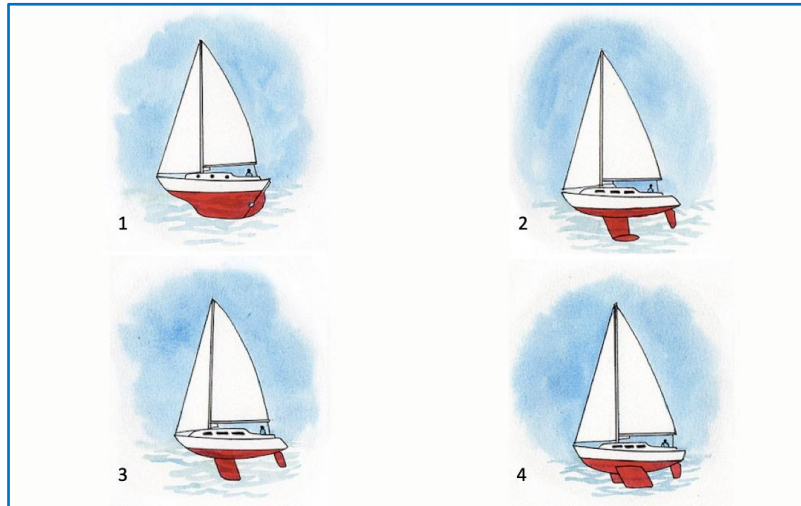


Figure 44 : Les différents types de quille

## G. Les équipements électroniques

La filière de collecte des équipements électroniques existe déjà chez les fabricants ou distributeurs. La filière REP des Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques (DEEE) a été créée pour répondre aux enjeux sanitaires et environnementaux. Elle est à la fois destinée aux DEEE des particuliers et des professionnels. Cette filiale est opérationnelle en France depuis 2005 pour les professionnels et depuis 2006 pour les particuliers.

En ce qui concerne les bateaux, ils sont pour la plupart désormais équipés de ces fameux DEEE et lors de l'étape de déconstruction, ils doivent être pris en compte et remis à la filière REP en question. Ce sont les déconstructeurs qui doivent s'engager à retirer ces équipements avant de broyer la coque du bateau.

Il existe 3 éco-organismes pour les DEEE professionnels :

- Ecologic
- Ecosystem
- (Screlec (spécialisé dans les piles et accumulateurs))

Les producteurs de déchets doivent adhérer à un de ces éco-organismes et ensuite enregistrer son inventaire en ligne. Pour l'enlèvement des déchets DEEE en fin de vie, ils doivent être conditionnés sur des palettes. Une fois les DEEE ramassés, le producteur va recevoir des documents obligatoires au suivi des déchets : BSD (bordereau de suivi des déchets), certificat... Cela permet de tracer les déchets avec les codes spécifiques du déchet et du traitement.



Ci-dessous, un schéma représentant la répartition des DEEE après leur ramassage en point de collecte en 2015 :

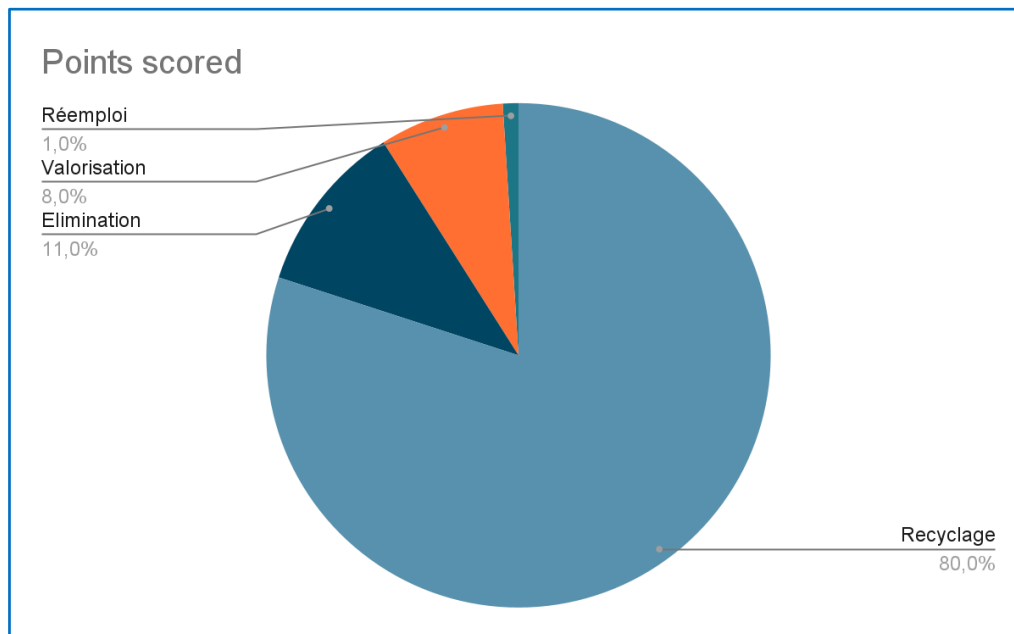


Figure 45 : Répartition des DEEE après leur ramassage en point de collecte

## H. Ce qui se fait dans le monde

### 1. La fin de vie des navires dans le monde

Pour étayer ce rapport, nous avons recherché comment se déroule la fin de vie des voiliers dans le monde. Dans les recherches, il n'est pas apparu de solutions de démantèlement de voiliers de plaisance mais plutôt de déconstruction de yacht de tourisme, de commerce ou militaire. L'Inde et le Bangladesh sont les plus gros pays de démantèlement de navires européens en fin de vie. On y retrouve des cimetières de bateaux. [FRANCETVINFO] Ils sont démantelés pour l'acier qu'ils contiennent et cette pratique permet l'emploi de nombreux travailleurs en Asie. Toutefois, une étude de *Greenpeace* et de la *Fédération Internationale pour les Droits Humains* a montré la dangerosité de ces activités. En effet, les travailleurs ne sont pas protégés face aux matériaux contenant de l'amiante, du plomb, des métaux lourds, de l'arsenic ou d'autres biocides toxiques. [FIDH] Le nombre de morts, de maladies et de handicaps liés à ces substances nocives est sous-estimé par les gouvernements. D'autres pays sont également des destinations privilégiées pour les navires à démanteler comme la Turquie, le Pakistan, ou encore la Chine. [DUSSOL, JAOUEN]

Ainsi, à la suite de ces scandales écologiques et humains, l'association *Robin des bois* a été créée en 1985 dans le but de mener des investigations de terrain, des rapports et des communiqués sur la lutte contre les dérives environnementales et humaines. [ROBINESBOIS]

En ce sens, l'éco-organisme l'APER lutte contre les pratiques dangereuses pour l'environnement et pour les hommes en organisant une filière de déconstruction réglementée. Il s'agit d'une première dans le monde.

## 2. Les matériaux alternatifs dans le monde

Le chantier naval de nos voisins allemands, *GreenBoat*, met en œuvre des matériaux bio composites. En 2009 à Düsseldorf, ils présentaient un voilier avec une coque à base de fibres de lin et d'époxy biosourcée. Cette green epoxy d'Entropy contient de l'huile de lin pour remplacer partiellement les dérivés du pétrole. Le chantier naval a également réalisé un modèle en panneau sandwich à base de fibre de lin et de liège. Cette entreprise travaille avant tout sur le cycle de vie de leur bateau et des matériaux utilisés. En quête d'innovation, l'entreprise travaille avec l'université de Brême sur le bambou. [MERLET, 2019]

D'autres tests innovants sont réalisés en France sur des chantiers de la côte Atlantique. On retrouve par exemple un trimaran à base de lin, de liège et de balsa, conçu en Bretagne par les entreprises Kairos et Tricat. [COAT, 2017]

Un voilier construit en fibre de bambou, le Floki 6.5, est mis à l'eau en juin 2021. Il s'agit du premier bateau réalisé en panneau sandwich à base de fibre de bambou. Il possède des renforts en carbone et la mousse de l'âme est composée de PET recyclé.

Un chantier naval de bateau à base de matériaux composites biosourcés et de fibres naturelles en partenariat avec les mines d'Alès est actuellement en réflexion. Il s'agit du projet EcoTransat. [TORTERAT, 2016]

Il y a également le premier bateau construit avec des matériaux composites en thermoplastique recyclable réalisé par Arkema et Lalou Multi. [COURSEAULARGE, 2016]

### I. Autour du voilier : entretien, lavage...

Les bateaux nécessitent un entretien régulier pour garantir leur pérennité. En moyenne, l'entretien de la coque se réalise une fois par an pour les voiliers de régates qui sortent souvent en mer. Pour cela, il est nécessaire de sortir le bateau de l'eau. La coque est nettoyée de tous les crustacés qui se sont accrochés sur la partie immergée.

En ce qui concerne le lavage du bateau à l'eau, il a lieu environ deux fois par an, une fois à la fin de l'été avant "l'hivernage" puis avant les premières sorties de la saison estivale suivante. Il en est de même pour le nettoyage des voiles. C'est une étape consommatrice de ressource.



Figure 46 : Nettoyage d'un bateau sur le vieux port de la plus belle ville de France

A la suite de ce nettoyage, il faut réaliser l'antifouling. Il s'agit d'une peinture biocide protectrice de la coque. Cette peinture est très nocive et agressive pour les milieux marins. En effet, elle est destinée à empêcher les organismes marins tels que les vers marins, les algues ou encore des bactéries, de s'accrocher sur la coque. Ce type de peinture, fortement concentré en produits chimiques, contient des substances toxiques pour la vie marine. C'est pourquoi son usage est réglementé et ses effets néfastes ont été reconnus par l'Organisation Maritime Internationale en 1989. En 1990, des mesures visant à interdire le tributylétain (TBT) sont mises en place pour des bateaux d'une certaine taille. Cette particule très toxique est un mélange de composés biocides qui s'est avéré être un leurre hormonal. Ce composé masculinise certaines femelles d'espèces marines, il est neurotoxique et génotoxique. Son utilisation s'est intensifiée dans les années 60'/70' avec l'essor de la construction navale et de la plaisance.

Actuellement, on retrouve des antifouling composés de cuivre, de zinc, et d'autres composés chimiques. La toxicité de l'antifouling est un danger direct pour les marins qui inhalent les résidus volatiles en appliquant ces produits et un danger indirect par le fait d'ingérer des animaux marins ou des fruits de mer ramassés aux abords des ports.

Des recherches sont en cours pour améliorer l'antifouling par l'application de peinture en silicone par exemple. Ce type de solution repose sur la "non-adhérence". En effet, les micro-organismes considèrent la carène comme un liquide et sont incapables de s'y fixer. Cette solution ne contient pas de biocide et est durable 2 à 5 ans. Toutefois, cette méthode ne convient pas pour les surfaces en bois et réduit légèrement la vitesse du bateau, ce sont les principaux freins à son utilisation.

Après avoir fait le tour des composants principaux d'un voilier de plaisance, nous pouvons aisément tirer la conclusion que ces matériaux ne sont pas écologiques, que ce soit lors de leur fabrication, pendant leur utilisation ou pour la fin de vie. En effet, s'ils restent au port, les bateaux s'abîment avec les années et des micro plastiques et des matières toxiques sont relâchés en mer. Bien que le facteur environnemental soit cité comme quelque chose d'important par les plaisanciers selon une étude Odit France, ce facteur ne conditionne pas le choix du bateau ni le changement des pratiques en mer et dans les ports. Ce sont plutôt les nouveaux plaisanciers et les jeunes qui portent attention à ce critère mais ils sont loin d'être majoritaires car le marché de la plaisance est porté par les retraités.

De nouvelles dynamiques émergent pourtant concernant la conception des bateaux, l'utilisation et la fin de vie. Des matériaux biosourcés font leur apparition dans les centres d'innovation et malgré la complexité des coques composites, on cherche un meilleur exutoire pour la fin de vie.

## IV. Vers une industrialisation des déchets nautiques ?

### A. Ecologie Industrielle et Territoriale (EIT)

Afin de mettre en place une filière de recyclage, réemploi, réutilisation des matériaux présents sur un bateau, il est essentiel de prendre en compte les autres acteurs du territoire qui pourraient potentiellement avoir des gisements similaires ou bien être intéressés par ces matériaux.

C'est avec une démarche d'EIT (écologie industrielle et territoriale) que nous souhaitons proposer un plan d'action pour les matériaux principaux d'un voilier de plaisance.

Petit rappel de ce qu'est l'EIT : « *L'écologie industrielle et territoriale (EIT) est un levier pour mobiliser les acteurs de terrain en faveur de la transition écologique. Elle se concrétise par la mise en commun volontaire de ressources par des acteurs économiques d'un territoire, en vue de les économiser ou d'en améliorer la productivité : partage d'infrastructures, d'équipements, de services, de matières... En proposant des solutions territoriales, coopératives et innovantes de gestion des ressources, l'écologie industrielle et territoriale transforme les systèmes de production et de consommation en favorisant les fonctionnements en quasi-boucle fermée. Elle s'inscrit dans la démarche « réduire, réutiliser et recycler » de l'économie circulaire.* » [ECOLOGIE.GOUV]

Ci-dessous, les principaux matériaux qui composent un voilier :

- Polyester
- Polyéthylène
- Carbone
- Nylon
- Bois
- Aluminium
- Coque composite

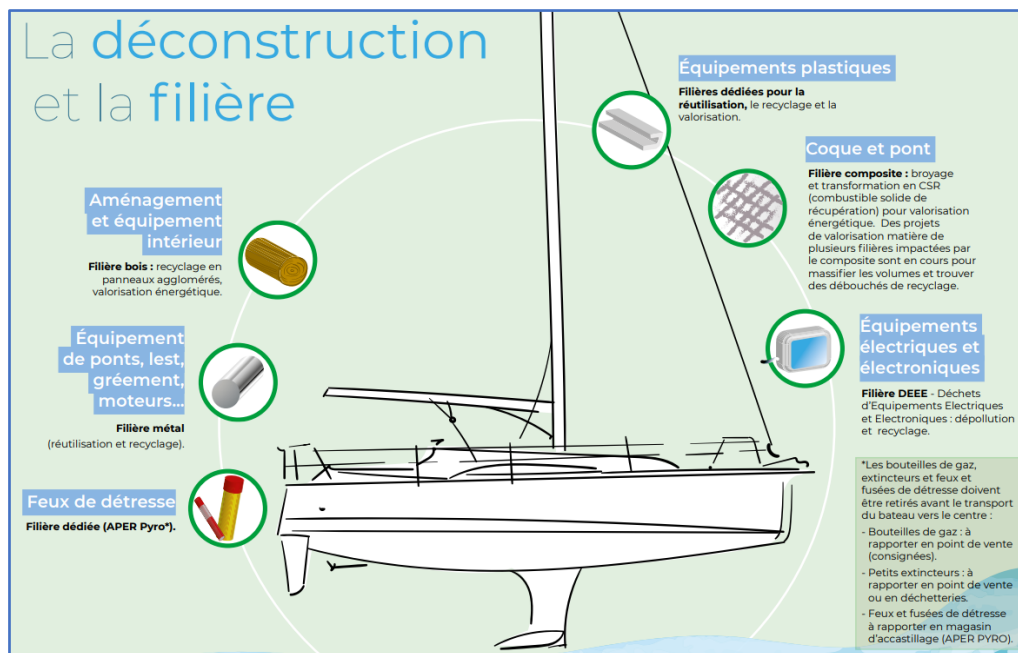


Figure 47 : La déconstruction et la filière – APER

## B. Les acteurs économiques qui utilisent des matériaux composites

Pourquoi parler d'EIT pour la filière du nautisme et de la plaisance ? C'est un secteur très consommateur de matériaux composites comme nous avons pu le voir précédemment. C'est principalement le composite fibre de verre-polyester qui est utilisé. Aucune solution viable n'existe pour le moment qui permette de séparer ce type de composite en fin de vie afin de réutiliser séparément la fibre de verre et le polyester. Ce composite est de plus en plus utilisé et en pleine croissance (10% entre 2018 et 2022).

Comment envisager une meilleure fin de vie que la valorisation énergétique ? Pour le moment, ce qui est fait par l'APER est de recenser des centres de déconstruction. Les coques de bateaux dans ces centres sont broyées et utilisées ensuite dans les routes par exemple.

Il n'existe pas de procédé pour recycler ces composites car c'est assez cher. Pourquoi ne pas regrouper plusieurs entreprises qui utilisent ces mêmes matériaux composites à la fois pour créer un gros gisement mais aussi pour créer une synergie et réfléchir à une solution de recyclage ? Mutualiser les intérêts et les moyens, c'est l'objectif de l'EIT.

Il existe déjà dans les Bouches-du-Rhône des exemples de démarches EIT qui fonctionnent bien comme PIICTO à Fos-sur-Mer. Il pourrait être intéressant de recenser les entreprises locales qui utilisent également des composites. Ci-dessous, on trouvera justement les secteurs les plus consommateurs en composite en France.

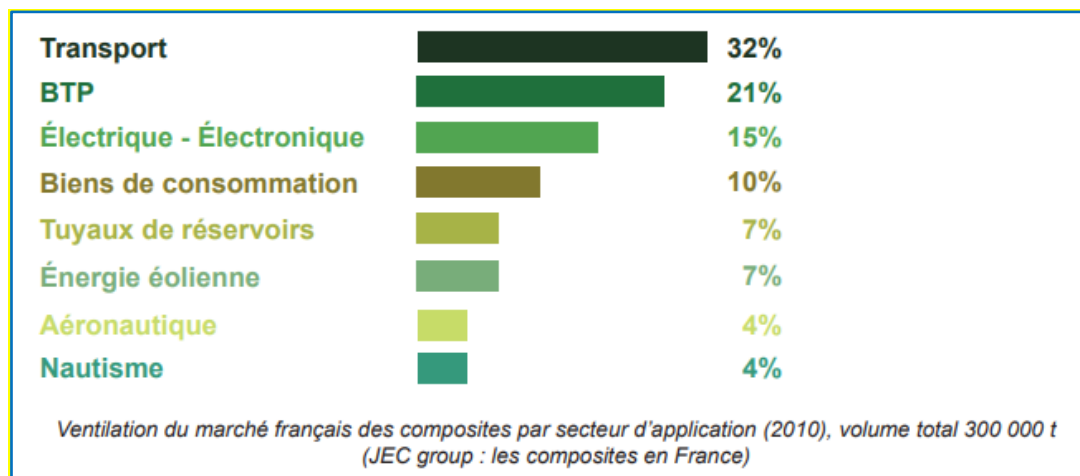


Figure 48 : Ventilation du marché français des composites par secteur d'application. [CRECOF, 2017]

Comme nous pouvons le voir dans le graphique ci-dessus, les secteurs qui se démarquent sont le transport, le BTP, l'électrique-électronique.

Afin d'initier très brièvement une démarche EIT, nous allons recenser les entreprises en Bouches-du-Rhône ou proches qui pratiquent ces activités. Ce premier recensement n'est pas exhaustif et ne peut pas permettre de lancer une démarche EIT mais elle a pour intérêt de commencer à cartographier les acteurs locaux sur le territoire des Bouches-du-Rhône.

- Transport
  - Chabas SAS (véhicules légers)



- BTP
  - Wavin France (éléments de construction et d'aménagement intérieur)
  - Société routière du Midi (structures en préfabriqués)
  - Lib Industries (éléments de construction)
  - Epco (éléments de construction)
  - Soc Alpine de préfabrication Béton (éléments de construction)
- Electrique-Electronique
  - Mirion Technologies SAS (équipements de mesure, de contrôle et automatisation)
  - Microchip Technology (composants, cartes électroniques)
  - Supersonic Imagine (équipements médicaux)
  - Setma Europe (moteurs et transformateurs électriques)
- Aéronautique
  - Airbus Helicopters (aéronautique civil)
- Naval
  - Chantier Naval de Marseille (construction navales)

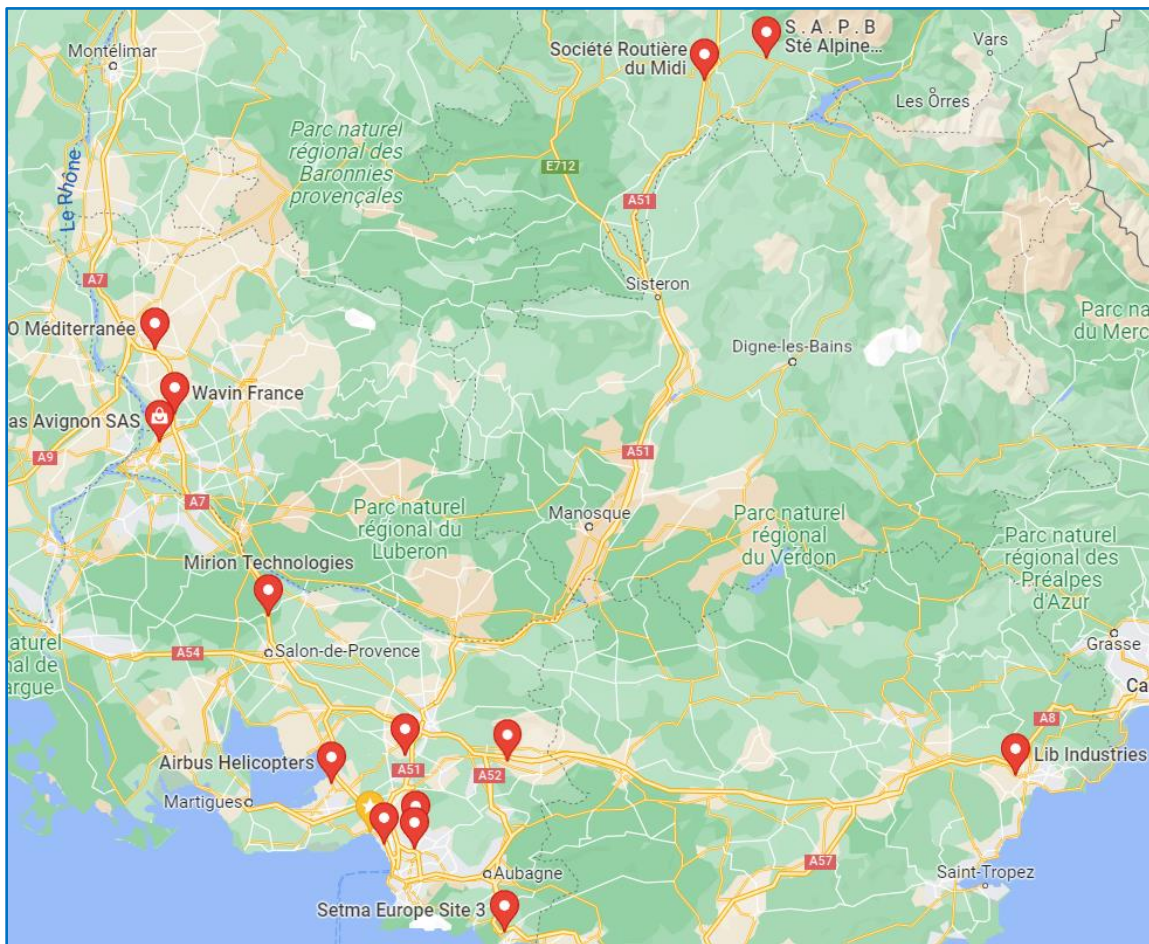


Figure 49 : Répartition des industries utilisant des matériaux composites dans le Sud-Ouest de la France

Les limites de cette cartographie sont que nous ne savons pas précisément quels composites sont utilisés par ces entreprises. Le plus utilisé reste le composite fibre de verre-polyester. Il est utilisé dans les secteurs énoncés plus haut mais nous ne pouvons pas affirmer avec certitudes la quantité du gisement, ni la proportion utilisée du composite fibre de verre-polyester comparé aux autres composites.

Il existe, comme il est évoqué dans cette étude, un procédé de recyclage par micro-ondes pour que les déchets de polymère soient dégradés pour en faire des monomères ce qui va permettre de les réutiliser dans d'autres produits. Cela permet notamment de récupérer la fibre de verre mais ce processus n'est pas jugé économiquement viable. Polyloop a développé en France le recyclage des composites à base de PVC mais la technologie (méthode STRAP) n'est pas encore utilisable à grande échelle.

Les parties précédentes et cette dernière nous ont permis de comprendre la difficulté des matériaux utilisés dans la fabrication d'un bateau. Cela rend parallèlement leur fin de vie compliquée, onéreuse et donc aucune solution viable n'est pour le moment développée pour traiter correctement la majorité des matériaux. Pourquoi ne pas chercher en amont à mieux concevoir les bateaux ? Certains matériaux ne sont-ils pas plus appropriés à la pratique d'une plaisance responsable ? Au lieu de recycler grâce à des procédés chimiques, thermiques... complexes, pourrions-nous réemployer les matériaux ? C'est ce nous allons tenter de voir par la suite.

## V. Quels sont les exutoires ?

Une grande partie du parc naval hors d'usage est actuellement coulée en pleine mer. Dans cette partie, à travers le réemploi et la réutilisation, nous détaillons les opérations permettant de prolonger la durée de vie d'équipements destinés à la décharge. Les solutions de valorisation énergétique des coques en résine composite sont également abordées.

### A. Une alternative : l'écoconception - penser et fabriquer durablement

Comme nous avons pu le voir précédemment, les matériaux qui composent un voilier sont particulièrement complexes, en passant par la coque, la voile ou encore la quille. Cette diversité de matériaux rend difficile le recyclage, le réemploi ou la réutilisation qui pourraient donner une seconde vie au bateau. Outre le fait de trouver des filières pour la fin de vie, pourquoi ne pas mieux penser la conception du bateau en amont ?

Des travaux ont été déjà réalisés pour utiliser des résines biosourcées, des fibres naturelles... comme cela pouvait se faire auparavant. L'architecte naval joue un rôle prépondérant dans cette partie de la réflexion. Son métier lui permet d'avoir une vision globale, il imagine la coque, le pont et le volume du navire, tout en s'assurant de sa bonne flottabilité. Il a également la connaissance des matériaux qu'il va principalement choisir en fonction de leurs propriétés techniques : légèreté, résistance, mécaniques, thermiques et acoustiques.

Se tourner vers des matériaux biosourcés ou des fibres naturelles permet de réduire la pression sur les ressources non renouvelables et de penser à la santé des êtres humains et de l'environnement. En effet, quelle que soit la fin de vie du bateau, ce qu'il va rejeter va finir soit dans la mer, soit dans le sol, soit dans les airs et ainsi polluer.

Bonne nouvelle : la part des bio-composites a progressé depuis 10 ans en Europe (12% des composites utilisés en 2010 et 22% en 2020).

#### 1. Les différents matériaux biosourcés qui peuvent composer une coque

- Les résines bio-sourcées :
  - **L'époxy lin** est une résine bi-composante à base d'huile de lin et d'autres bio-polymères (cellulose ou l'amidon par exemple). Ce type de résine contient jusqu'à 85% de molécules naturelles et transparentes, sans solvant et sans odeur. On obtient une grande résistance mécanique et chimique qui convient parfaitement à une mise en œuvre en milieu marin.
  - **L'Épolin UV** est une autre variante de résine bio-sourcée à base d'huile de lin qui va réticuler (durcir) sous l'effet des UV, soit naturellement au soleil soit avec des lampes UV.
  - **Greenpoxy 56** est une résine avec plus de 50% de la composition de la structure moléculaire, elle est dérivée de plantes et de matières végétales. Transparente et résistante à l'eau, elle permet la réalisation de stratifiés robustes, brillants et résistants à l'usure. [ZAMPROGNO, HOURCOURIGARAY, 2012]



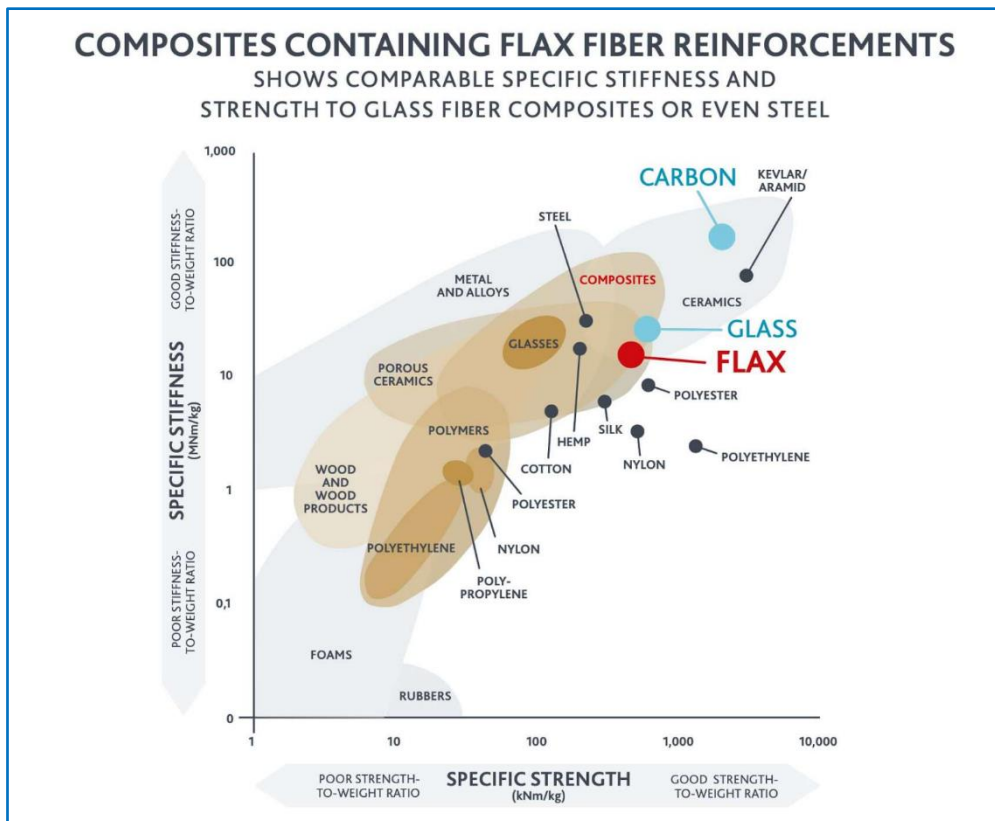


Figure 50 : Propriétés des matériaux constituant les composites

Comme nous pouvons le voir ci-dessus, le lin, la soie ou encore le coton présentent des propriétés de solidité et de rigidité au même titre que des matériaux issus du pétrole. [KAIROS]

a) Les fibres naturelles

- Les **fibres végétales** sont des structures biologiques principalement composées de cellulose issues du lin, du chanvre ou du jute. Avec sa grande solidité et son intérêt économique, ce type de fibre est très recherché comme substitut à la fibre de verre. On peut fabriquer de la fibre végétale plus légère, plus solide et moins chère que la fibre de verre. L'origine renouvelable et la durabilité (stabilité, performance dans le temps) sont importantes, de plus, elles demandent peu d'énergie pour être produites. Il est également possible de réduire la masse de certaines pièces. L'aspect naturel des matériaux est également un argument de poids si l'on pense au design. [LE DIGABEL-HOULLIER, 2004], [FICHOT,2021] Cependant, l'affinité naturelle avec l'eau ainsi qu'une moins bonne tenue dans le temps sont problématiques pour un usage nautique.
- Les **fibres minérales** sont généralement à base d'amiante ou de basalte. Les fibres d'amiante présentent de nombreux avantages (le coût, la possibilité de mélanger avec la fibre de verre), mais favorisent l'action de produit cancérigène sur l'homme. Les fibres de basalte sont issues d'une roche volcanique et présentent de nombreuses propriétés intéressantes pour le nautisme : résistance supérieure à la fibre de verre, résistance aux UV, aux produits chimiques et surtout, c'est un matériau inerte, non toxique, non cancérigène dont le coût n'est pas supérieur à la fibre de verre.

### b) Les panneaux sandwichs

- Les filières nautique et aéronautique, dans une recherche de gain de poids et avec les mêmes caractéristiques mécaniques, utilisent des panneaux composites « sandwichs ». En fait on enferme entre deux couches de composite (A) classique une âme (B) dans un matériau léger et résistant à la compression : du bois (balsa), de la mousse PVC ou de l'aluminium en nid d'abeille. [ECOCHARD, 2019]
- Outre le PVC et l'aluminium qui sont très énergivores lors de leur fabrication, il est possible de se tourner vers de la mousse PET. Ce PET peut d'ailleurs être issu de plastique recyclé (comme celui qui compose les bouteilles d'eau). On peut prendre l'exemple des mousses Airex ou ArmaForm qui sont constituées de PET et qui sont recyclables en fin de vie.
- Pour fabriquer la coque sandwich en composite, la mousse PET peut être associée à du basalte qui est un matériau léger et robuste. La fibre de basalte peut être fondue et recyclée en fin de vie. [NC, 2020]

Exemple : Voici un exemple concret de bateau innovant utilisant des matériaux biocomposites : le Gwalaz. Pour remplacer fibre de verre et PVC, fibre de lin, liège et balsa ont été utilisés.



Figure 51 : : le Gwalaz

Plus de détails sur le composite ou bio composite : il associe un bio-polymère et des bio-fibres comme nous avons pu le voir un peu plus haut. Cette association permet un meilleur recyclage en fin de vie du produit, même s'il est broyé il pourra être incorporé dans un compost. [LEFEVRE et al]

## 2. Quelques inconvénients aux fibres végétales

Comment mettre en œuvre un matériau composite à base de fibres végétales :

- Les températures exigées par certains procédés peuvent parfois endommager les fibres. Il faut donc prendre en compte ces conséquences sur les propriétés finales du matériau.
- Les hautes températures sur les fibres végétales peuvent entraîner les émissions de composés organiques volatiles (COV) entraînant des odeurs.
- Il faudra aussi procéder à une étape de séchage car les fibres végétales contiennent de l'eau.

## 3. Comment choisir les matériaux bio sourcés ?

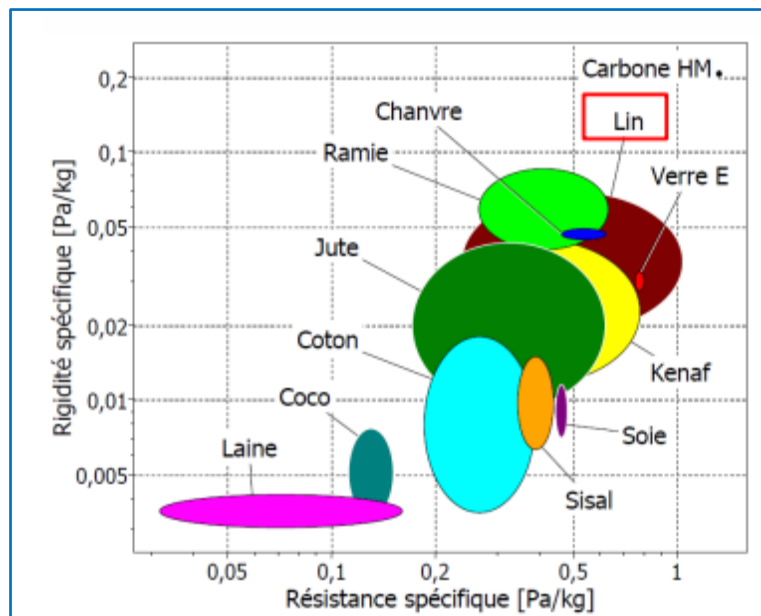


Figure 52 : Carte de sélection des fibres de renfort. [MONTI, 2016]

Ci-joint, le choix **des fibres renfort**. Nous pouvons constater que les propriétés des fibres de lin, de chanvre et de ramie sont proches de la fibre de verre. La fibre de lin sera privilégiée car :

- Importante culture de lin en Europe
- Les fibres sont plus longues que le chanvre par exemple et donc plus résistantes

Nous allons désormais analyser le **choix de l'âme** : le balsa sera privilégié car il se renouvelle assez rapidement en comparaison au douglas et peut fournir de gros panneaux par rapport au bambou.

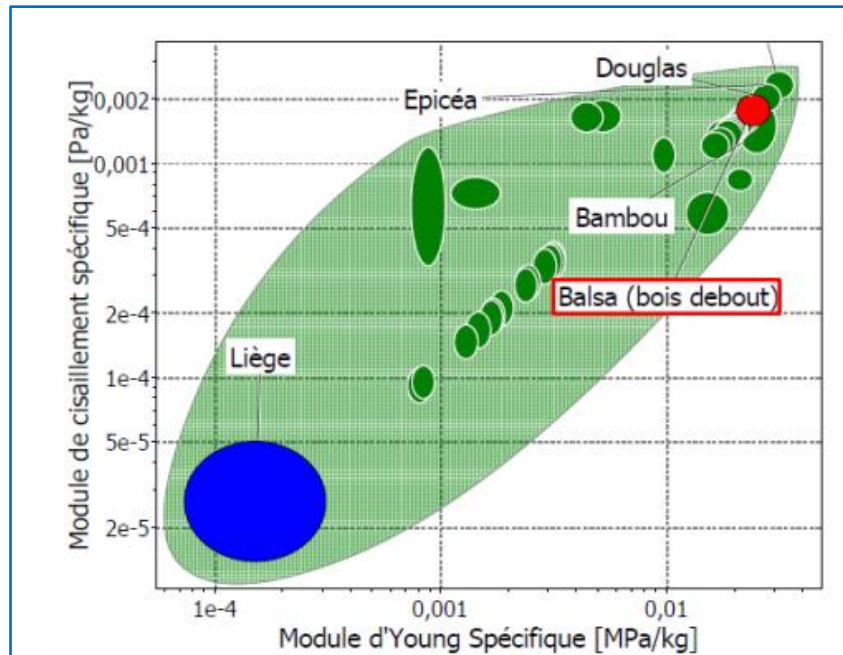


Figure 53 : Carte de sélection de l'âme Erreur ! Signet non défini.

**Choix de la matrice** : il est difficile de trouver des polymères biosourcés qui aient de bonnes propriétés thermoplastiques. Les thermodurcissables partiellement biosourcés existent mais ne peuvent pas être recyclés. Il existe désormais la résine Elium de Arkema : polymère thermoplastique à la viscosité quasi similaire aux résines Vinylester et Polyester. Elle peut potentiellement être recyclée/décyclée avec possibilité de refaire des pièces composites thermoplastiques. [NOUIGUES]

#### 4. Le bois et le strip-planking

Le bois est un matériau biosourcé. Bien que moins utilisé aujourd'hui, des techniques existent comme le strip-planking ou le bordé latté. Cette méthode consiste à coller des lattes de bois sur un mannequin inversé avec de la colle époxy. L'assemblage collé est stable et parfaitement étanche, de plus, l'exécution est plus rapide que le clouage.

Les lattes sont légères et faciles à manipuler, le bois utilisé doit être issu d'une essence stable, au fil droit, sans nœuds ni contre-fil trop marqué. Il s'agit classiquement du cèdre rouge, également appelé « red cedar », toutefois certains bois européens ou africains sont tout aussi adaptés, comme l'épicéa ou les acajous légers de type Grand Bassam, Agba, Samba, etc.

Les performances mécaniques de cette méthode sont de haut niveau.





Figure 54 : La construction d'un bateau en bois avec la méthode du strip-planking

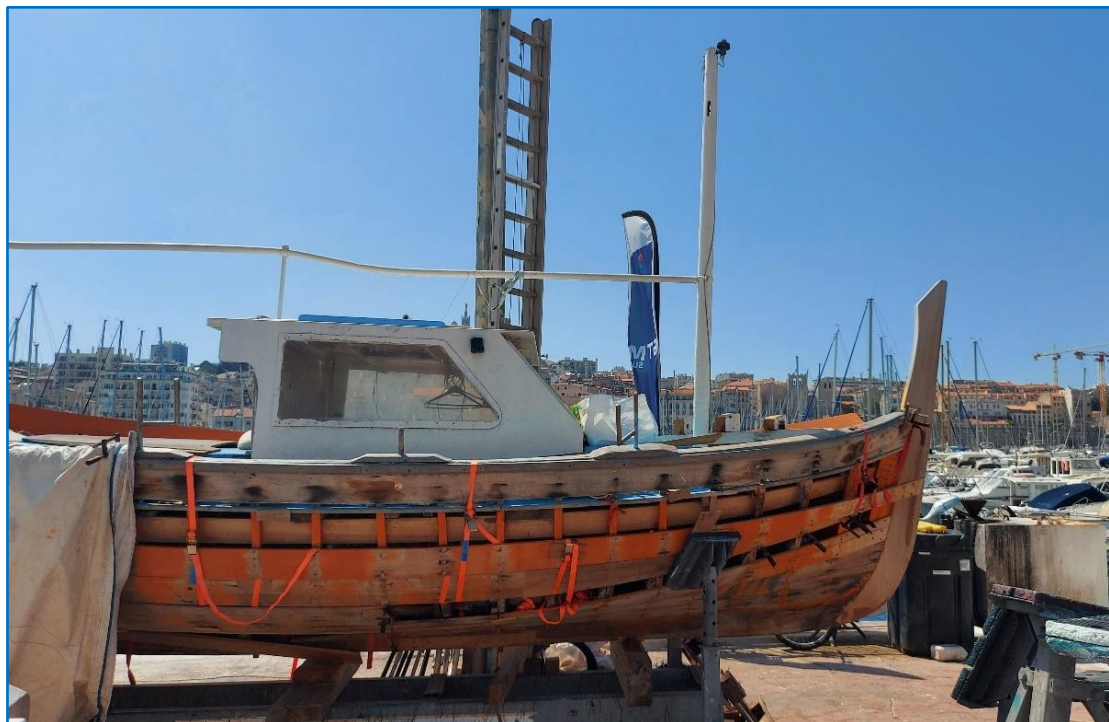


Figure 55 : Bateau en bois en construction sur le vieux port de Marseille

Aujourd'hui, la solution la plus courante passe par un lattage renforcé par une stratification sur une ou deux faces. Cette dernière méthode s'apparente à une structure en sandwich composite à haute performance, avec une âme lattée en bois léger (red cedar, samba, épicéa...) assez mince (de 10 à 25 mm) au lieu de la mousse PVC.

## B. Les limites du réemploi : et si d'autres secteurs étaient intéressés ?

L'agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) caractérise le *réemploi* par « 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 ».

De ce fait, le réemploi d'équipements sans transformation provenant d'un voilier pour les insérer dans un autre bateau est assez ardu car chaque bateau est différent, avec des typologies de coques, des formes et des destinations différentes. Il s'agit d'une des limites de l'application du réemploi des matériaux composants les bateaux. Cependant, le réemploi est intersectoriel : un équipement provenant d'un navire peut être placé dans un bâtiment par exemple. Cette thématique peut amener à des créations originales, par exemple, nous pourrions imaginer le réemploi de hublots provenant de navires dans un bâtiment. En remarquant tout de même qu'un hublot ne peut pas remplacer une fenêtre de bâtiment en tant que telle, car les réglementations thermiques sont très strictes au sujet des déperditions. Toutefois le hublot peut être utilisé en double peau de façade comme les fenêtres du Conseil Européen ou encore inséré dans une cloison intérieure.



Figure 56 : Façade du Conseil Européen. [OPALIS]

Les équipements de menuiserie intérieure au bateau peuvent également être réutilisés dans une pièce.

Notons que dans ces exemples, nous assimilons le terme de réemploi à celui de réutilisation. La *réutilisation* désigne « toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui sont devenus des déchets sont utilisés de nouveau pour un autre usage que leur usage initial ».

Il existe également une autre forme de réutilisation, il s'agit de *l'upcycling*, qui consiste à récupérer des matériaux ou équipements usagés pour les transformer et les rénover en élément de qualité supérieure. Cette technique est appliquée notamment aux voiles usagées. Des créations telles que des sacs, des toiles de transat ou encore des luminaires sont réalisées par des entreprises telles que *727 Sailbags*, *les toiles du large* ou encore *Ah5 Sailing*.





Figure 57 : Exemple de sac à main en voile. [727SAILBAGS]

Les éléments cités plus haut sont séparés du voilier usagé, mais la problématique du réemploi des navires entiers a déjà été abordée dans certaines entreprises et associations. Il s’agit de changer la destination de l’entièreté du bateau en fin de vie. L’association marseillaise Yes we camp située dans le tiers lieu Foresta, accompagnée de Nicolas Lanteaume, a mis en place un projet de ce type. Ils ont réhabilité des voiliers usagés pour en faire une auberge de jeunesse.



Figure 58 : Réhabilitation de bateaux à Yes We Camp à Marseille. [LANE, 2019]

L’entreprise *Bathô*, fondée par Didier Toqué et Romain Grenon, réhabilite des voiliers pour les transformer en salle de réunion ou de coworking, en gîtes ou en hébergements insolites, ou encore en jeu pour enfants ou en “boat-truck”. Ce chantier naval au sud de Nantes réutilise des bateaux typiques datant des années 70’/80’, isole thermiquement et acoustiquement les coques usagées et aménage son intérieur. Les bateaux sont vendus entre 15 000 et 20 000 euros et s’affranchissent des contraintes urbanistiques. L’entreprise *Bathô* propose également des stages et des formations aux métiers de menuisier, de restructuration manuelle... Des architectes et des ingénieurs sont également intéressés par ce type de chantier naval.



Figure 59 : Réhabilitation d'anciens voiliers par l'entreprise Bâtho. [BATHO]

Au niveau international, le quartier démonstrateur de ville durable situé sur une ancienne friche industrielle à De Ceuvél à Amsterdam est constitué d'anciennes péniches rénovées.



Figure 60 : Péniches aménagées à De Ceuvél à Amsterdam. [BESUSTAINABLE]

Ces solutions sont des alternatives à la mise en décharge des bateaux usagés.

Les entreprises de vente de matériaux à l'unité, comme *Casse marine enlèvement*, vendent des pièces détachées de seconde main. Il existe également des sites internet, comme *Leboncoin*, destinés aux équipements de bateaux : il s'agit par exemple de *Annoncesmarines.com*.

Ces types d'exutoires décrits ci-dessus concernent une infime partie du parc naval actuel. Dans la partie suivante nous présenterons les exutoires principaux des navires en fin de vie.

### C. Exutoires, actuels et potentiels futurs, des coques en résine composite

L'APER a suivi la déconstruction d'un voilier avec une coque en polyester datant des années 1960. Ils ont recensé les quantités de matériaux suivantes :

Matériaux économiquement valorisables		Matériaux économiquement <u>non</u> valorisables	
Fonte	472 kg	Eaux noires	240 litres
Aluminium	24 kg	Bois (aménagement intérieurs)	175 kg
Inox	26 kg	DIB (vaigrage, etc.)	175 kg
Mousse	15 kg	Composite polyester (coque)	280 kg
Acier	40 kg		
<b>Total</b>	<b>577 kg</b>	<b>Total (hors liquide)</b>	<b>630 kg</b>

Figure 61 : Matériaux issus d'un voilier en déconstruction. [APER]

On remarque que les matériaux composites représentent presque la moitié des matériaux non valorisables. Actuellement, ils sont très souvent éliminés en centre d'enfouissement ou valorisés en cimenterie sous forme de combustible solide de récupération. Ainsi, des expérimentations de valorisation ont été menées, notamment avec des essais d'incinération du composite. Les essais ont montré que les résines composites en fibre de verre et polyester ont un fort pouvoir calorifique.

Dans les parties suivantes nous présentons un état des lieux actuel des différentes filières de valorisation.

#### 1. Exutoires actuels

Actuellement, il n'existe pas de solution industrialisée pour séparer les différents composants (le renfort et la matrice) des résines composites, il n'est donc pas possible de les recycler. En ce sens, 90% des déchets de composite sont mis en décharge. En attendant que des méthodes de séparation des matériaux composites apparaissent, ce type de matériau est valorisé énergétiquement par plusieurs procédés [SCHWANDER] :

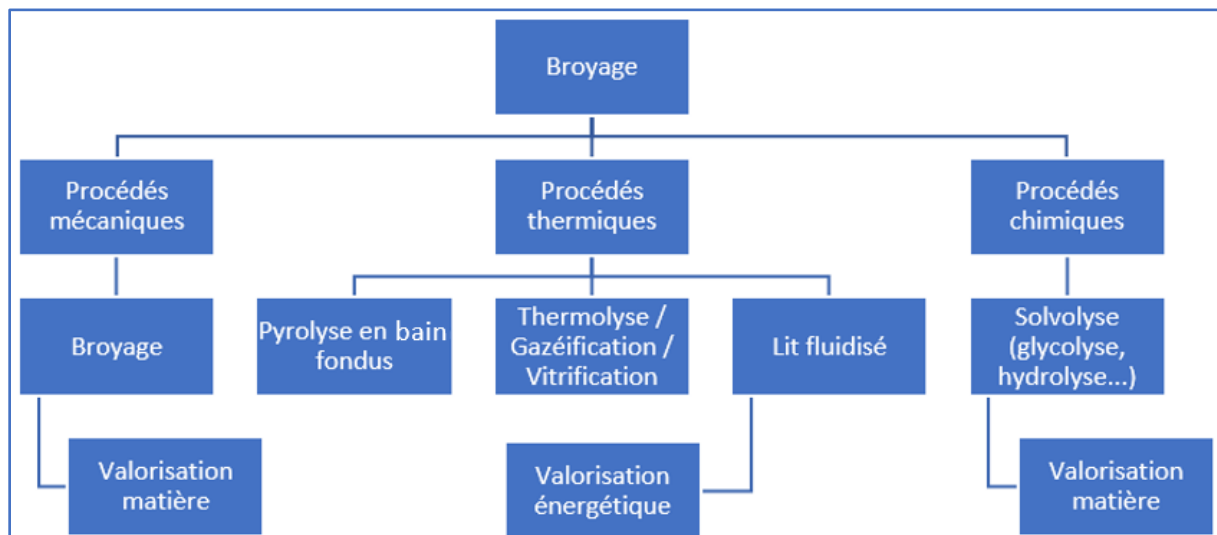


Figure 62 : méthode de recyclage des composites. [NOUIGUES]

La filière de déconstruction existante se focalise sur la valorisation énergétique des composites en polyester et fibre de verre. La valorisation énergétique consiste à utiliser les calories contenues dans



un déchet en l'incinérant et ainsi en récupérant l'énergie produite sous forme de vapeur ou d'électricité. La valorisation énergétique peut être réalisée en usine d'incinération ou en cimenterie. Les déchets liés aux chutes de matières lors de la fabrication des coques sont également revalorisés énergétiquement.

Il existe trois types de procédés de valorisation des déchets composites :

- Procédé mécanique
- Procédé thermique
- Procédé chimique

a) *Le broyage*

Ces trois méthodes nécessitent un broyage des éléments composites au préalable.

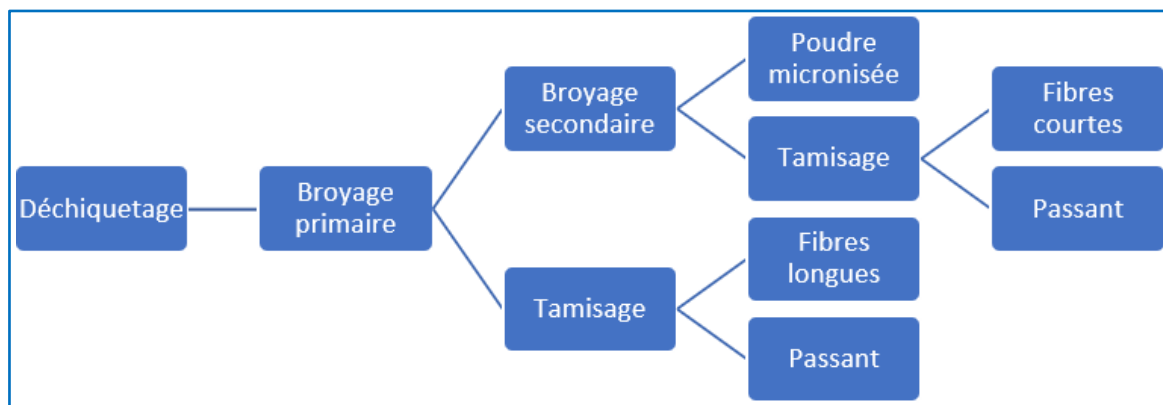


Figure 63 : Etapes de broyage des composites - [HADJER, 2011]

Ainsi, un premier broyage est effectué pour séparer les fibres longues (entre 10 et 15mm) et la poudre. Puis, un second broyage a lieu pour obtenir des fibres courtes et de la poudre micronisée.



Figure 64 : Les produits issus du broyage

b) *Le procédé mécanique*

Ce type de recyclage dégrade les caractéristiques du matériau. Les fibres longues sont récupérées et introduites dans les bétons de dallage, dans les composites de ciment, dans les enrobés

routiers, en renfort dans les thermoplastiques ou introduites dans les SMC/BMC. Les fibres courtes et la poudre micronisée sont incorporées en renfort dans les thermoplastiques. La poudre micronisée est également introduite comme charge dans les SMC/BMC.

Le SMC (Sheet Molding Compound) est un mélange de résine polyester, de charges inertes, de fibres de renfort, de catalyseurs, de colorants et d'inhibiteurs, d'agents de démoulage et d'épaississants.

Le BMC (Bulk Molding Compound) est un mélange de résine thermodurcissable, additionné de diverses charges inertes, de fibres de renfort, de catalyseurs, d'inhibiteurs et de colorants, pour le moulage par injection généralement.

Le recyclage mécanique est un procédé coûteux : environ 450 euros/tonne. Dans ce procédé on remarque qu'une partie de la matière peut être réutilisée pour recréer du polyester. Toutefois, il s'agit que d'une petite partie de ce type de déchets.

### c) Le procédé thermique

Ce procédé permet de transformer les déchets en énergie ou en matériaux. Il est réalisé par incinération, par thermolyse ou par pyrolyse.

#### (1) Incinération

Le procédé d'incinération permet de brûler les composites. Il peut être effectué dans une unité d'incinération d'ordures ménagères (UIOM) à une température de 400°C pendant deux à trois heures environ.

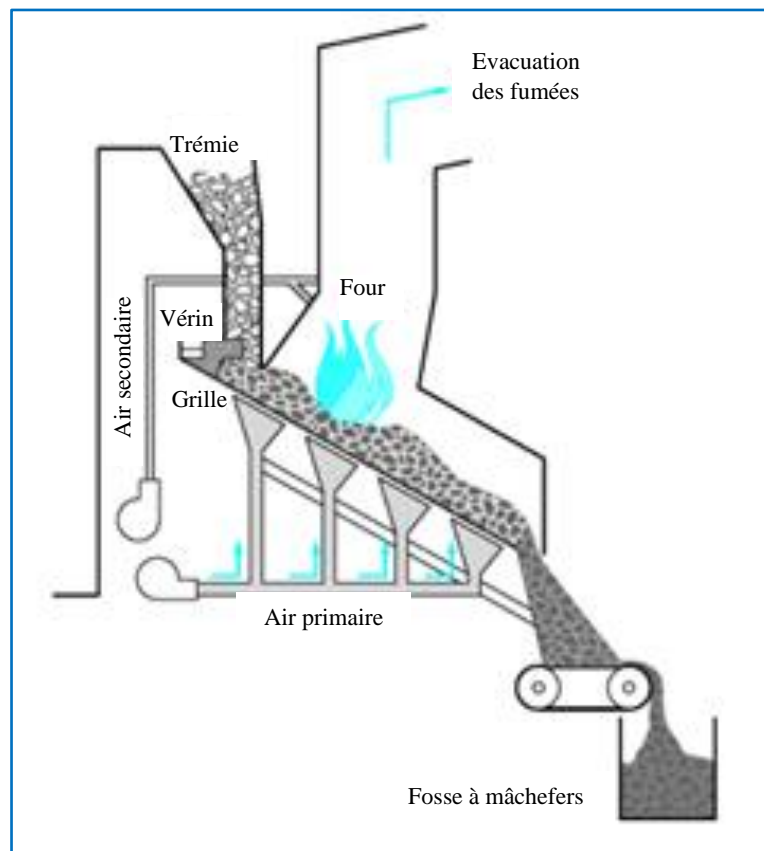


Figure 65 : Principe de l'incinération dans une unité d'incinération d'ordures ménagères (UIOM) – [HADJER, 2011]

Ce procédé rejette des mâchefers (qui peuvent être utilisés dans le génie civil dans certains cas) ainsi que des fumées d'incinération.

Il peut également être mis en œuvre en cimenterie pour brûler des composites therm durcissables en guise de combustibles de substitution. Ainsi, la cuisson est réalisée à 1450°C dans un four cylindrique rotatif.

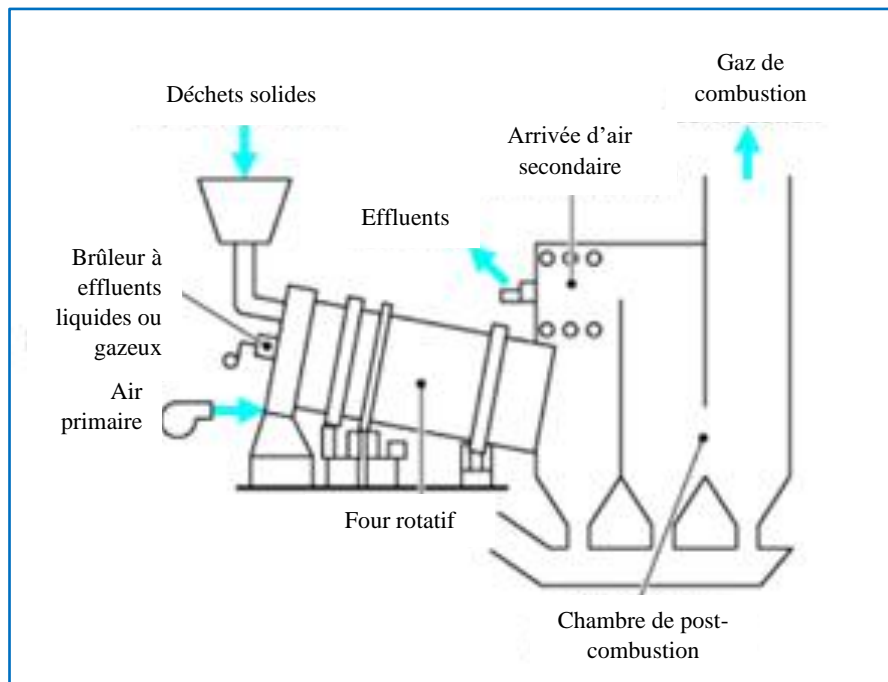


Figure 66 : Principe de l'incinération dans une unité d'incinération d'ordures ménagères (UIOM) – [HADJER, 2011]

L'incinération en cimenterie nécessite un gros gisement de matière et donc un regroupement de plusieurs entreprises.

## (2) Thermolyse

La thermolyse est un procédé qui permet de brûler les déchets à température moyennement élevée (450°C – 750°C) et sans oxygène. En l'absence d'air et sous l'effet de la chaleur, les déchets se décomposent en deux parties : en gaz et en résidu solide, ne comportant ni métaux lourds, ni dioxine. A la sortie du four, les déchets solides sont plongés dans l'eau et valorisables sous forme de matière. Les fumées produites sont moins importantes que pour l'incinération et ne contiennent ni dioxines ni métaux lourds.



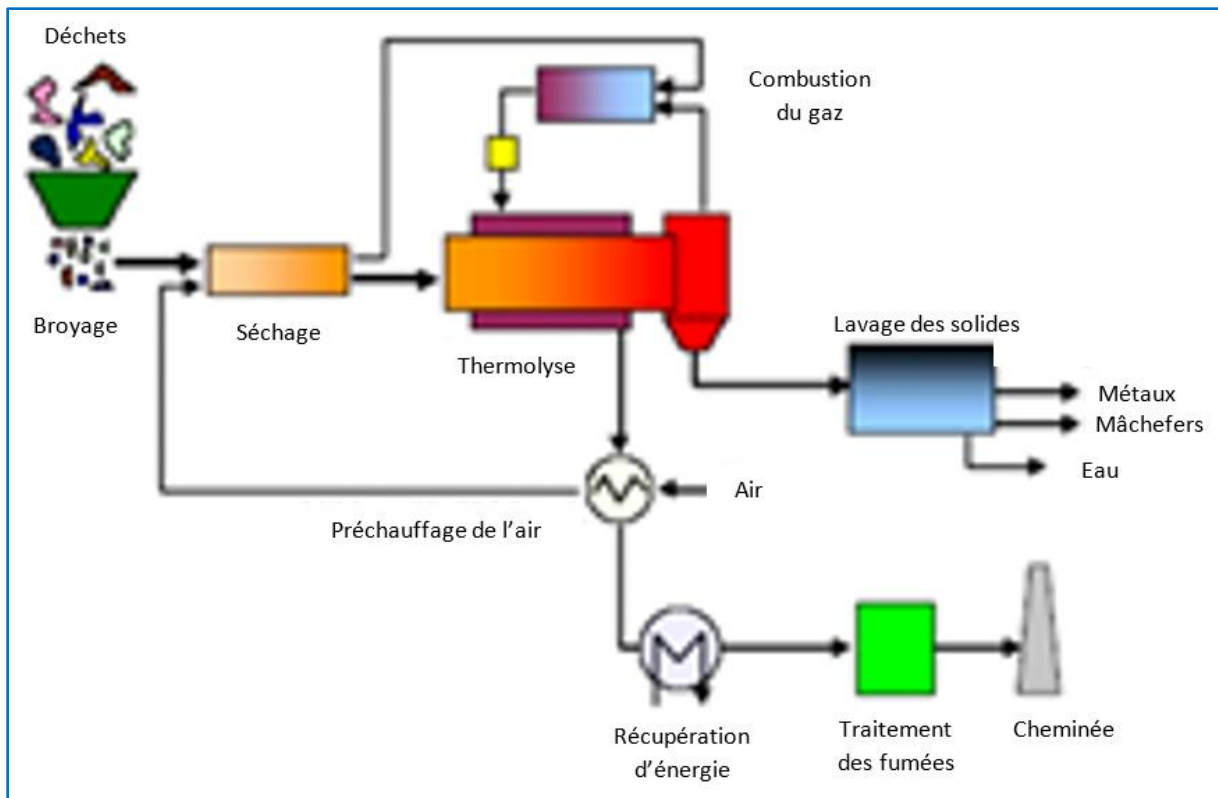


Figure 67 : Principe de la thermolyse - [HADJER, 2011]

Il existe d'autres procédés comme la thermolyse à bain fondu ou bien la thermolyse à lit fluidisé.

### (3) Pyrolyse

Ce procédé permet la séparation de la matrice et du renfort. Pour cela les déchets sont traités à très haute température (1200°C – 1500°C) et il y a une dégradation de la matrice. La résine est volatilisée en molécule tout en dégageant du dioxyde de carbone, de l'hydrogène, du méthane et du charbon. Les fibres de verre du renfort se trouvent contaminées par le charbon et doivent donc subir un traitement après la séparation à température de 450°C. De ce fait, les fibres de verre subissent deux cuissons, ce qui provoque une très forte baisse de leurs propriétés mécaniques et les rend inutilisables en tant que telles. En sortie du four, on récupère des granulats de verre et des poussières métalliques pouvant être recyclées. Les granulats de verre peuvent être utilisés en tant qu'abrasif ou dans le BTP.

#### d) Le procédé chimique

Le procédé chimique se base sur la solvolysse et permet de casser les liaisons grâce à des solvants pour revenir aux matériaux initiaux et il permet de dissoudre le matériau grâce à un solvant sélectif. Cette méthode est utilisée avec des thermoplastiques. Le composite se désassemble et la matrice perd ses propriétés mécaniques, il est donc possible de récupérer les renforts par filtration. Ce type de recyclage expérimental fonctionne plus ou moins en fonction du type de composite utilisé.

## 2. Exutoires en recherche

Existe-t-il une alternative d'exutoire ? Est-ce que ce processus d'exutoire est industrialisé ? Quel serait le prix ?

### a) *La séparation du renfort en carbone et de la matrice*

La majorité des coques de voiliers est constituée de matériaux composites très difficilement recyclables car ce sont des matériaux mélangés. Des solutions se développent pour séparer les fibres de carbone des matériaux composites. Par exemple, l'entreprise Xcrusher a mis au point un procédé pour séparer les fibres de carbone de leur matrice polymère sur la base de puissance pulsée de forts courants électriques qui ne détruisent pas ou très peu les propriétés mécaniques du matériau. [XCRUSHER]

### b) *Le laminage à froid*

Nous avons pu lire la thèse de Nouigues Arbia sur *Le recyclage des pièces en composite polyester en fibre de verre de grande dimension par laminage*, où il développe une partie sur une technique de recyclage des matériaux composites sans dégradation des propriétés mécaniques de matière.

Dans sa thèse, il décrit une méthode thermo-mécanique de laminage. Le laminage consiste à réduire l'épaisseur du matériau en le faisant circuler entre deux roues afin de l'aplanir. Cette déformation est obtenue par la compression et le cisaillement lors de son passage entre les cylindres. Il existe le laminage à chaud ou le laminage à froid.

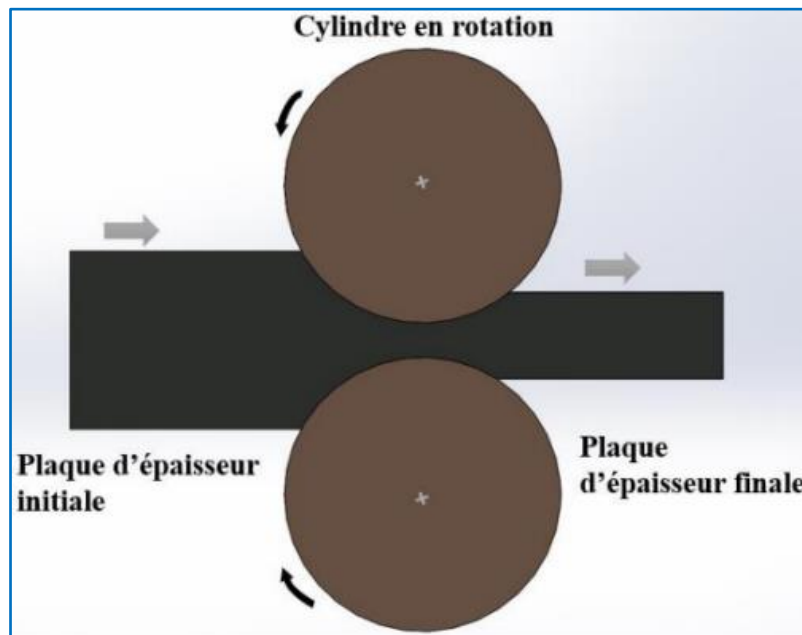


Figure 68 : Schéma de principe du laminage - [NOUIGUES]

Le laminage à froid permet d'accroître la limite d'élasticité des matériaux, leur résistance à la rupture ainsi que leur dureté mais il dégrade leur ductilité.

Le laminage à chaud permet de fortement déformer le matériau et améliore les caractéristiques mécaniques dans le sens de l'étirement. Ainsi les éléments peuvent prendre une autre forme pour un autre usage.

### c) *Le processus de dépolymérisation*

Le processus de dépolymérisation permet de transformer un polymère en monomère.

La société Korec, en Toscane, a développé un processus thermo-chimique permettant de séparer les résines et les fibres des matériaux composites. Il s'agit de dépolymériser la résine composite. Pour cela, la résine est chauffée à haute température et du CO<sub>2</sub> est ajouté, permettant ainsi la séparation des fibres de verre et du liquide. L'entreprise affirme que :

*« Le système fonctionne avec les résines polyester orthophtalique et isophtalique, ainsi que vinylester. Nous avons également testé le procédé sur des déchets mélangés avec différentes résines, mais aussi des sandwichs avec des morceaux de bois ou d'âmes en PET et du gelcoat comme on en trouve sur les bateaux. Dans tous ces essais, le liquide conserve un niveau de polymérisation analogue, quel que soit le type de résines présent dans le déchet originel »* explique Laura Saviano.

A la suite de ces recherches, l'entreprise a réalisé des pièces avec la résine ainsi récoltée. Ils ont confectionné un toit de camping-car ou encore des tiroirs de rangement en composite. Laura Saviano indique que :

*« Les essais avec un taux de liquide de récupération Korec entre 10 et 20% ont montré des caractéristiques mécaniques équivalentes à des résines neuves, en termes de rigidité, de résistance à la flexion, à la traction et à la compression »*

En mars 2019, une première usine à échelle industrielle doit ouvrir pour recycler les résines composites. Pour la rentabilité de l'équipement, un minimum de 500 tonnes doit être traité chaque année. [MERLET, 2021]

### d) *La vapo-thermolyse*

L'entreprise Alpha Recyclage Composite, basée à Toulouse, développe une filière de valorisation des matériaux composites à base de fibre de carbone depuis 2009, en partenariat avec le Centre RAPSODEE de l'Ecole des Mines Albi-Carmaux. La filière repose sur le traitement des déchets de composites par vapo-thermolyse, actuellement industrialisé par la société Alpha Recyclage Franche-Comté pour la valorisation des pneumatiques usés. [ARCOMPOSITES]

Lors de la vapo-thermolyse, le matériau composite est chauffé en présence de vapeur d'eau, cela décompose la résine et les fibres de carbone peuvent être extraites tout en conservant une grande partie de leurs propriétés initiales. Ainsi, cette méthode combine la pyrolyse et la vapeur d'eau surchauffée à pression. Ce procédé permet de valoriser 80% du carbone contenu dans les résines composites entrantes. [RECYCLINGCARBON]

A la suite de quoi, les fibres de carbone sont recyclées dans la fabrication de produits semi-finis pour être insérés dans la fabrication de matériaux composites de seconde génération.

Nous remarquons, qu'il existe d'avantages de solutions de recyclages pour les résines composites à base de renfort en fibre de carbone. Toutefois, dans le domaine nautique, le marché des coques en résine composite à base de fibre de verre est plus développé que les coques en résine composite à base de fibre de carbone.

## VI. Conclusion

L'univers de la plaisance maritime, bien qu'encré dans un environnement naturel à la biodiversité d'une grande richesse, ne s'est pas développé dans ce sens. Comme nous avons pu le voir, la plaisance est avant tout un loisir voire un moyen de s'élever socialement. Que ce soit d'un point de vue de celui qui fabrique le bateau que de celui qui l'achète, la priorité est donc de construire en masse à faible coût pour rendre la plaisance la moins onéreuse possible. En découle nombre de conséquences : matériaux issus du pétrole avec quasiment aucun exutoire possible en fin de vie, des bateaux abandonnés dans les ports qui finiront par couler et parallèlement des ports surchargés, des loyers très élevés. En définitif, pas grand-chose qui pousse à avoir un comportement responsable vis-à-vis de ce loisir.

Le défi est grand mais certains architectes navals, navigateurs, chercheurs se sont penchés sur la question en repensant tout d'abord le rapport entre la plaisance et son environnement : la mer. Partir de ce postulat c'est déjà reconsidérer la manière de fabriquer le bateau notamment avec des matériaux plus responsables, biosourcés. Nous en sommes venus à la conclusion que les matériaux à favoriser étaient ceux précédemment utilisés par les précédentes générations : le lin, le chanvre etc... L'enjeu est également de réduire la complexité des matériaux pour espérer avoir un exutoire soutenable pour leur fin de vie. Les matériaux composites de la coque étant pour le moment très difficile à séparer et donc à valoriser.

Malgré la création de l'APER pour désencombrer les ports, il manque souvent de gisement de matière pour créer une vraie filière de recyclage par exemple. Il reste le réemploi où la matière brute est réutilisée comme telle mais cela reste une niche pour le moment. Les filières utilisant des composites doivent s'associer afin de faire émerger à échelle industrielle un recyclage voire une valorisation autre que la valorisation énergétique.

Il est essentiel aux vues des défis environnementaux de repenser le rapport à la plaisance non plus comme un bien commercial ou un moyen de se différencier socialement mais plutôt comme l'opportunité de mieux connaître l'environnement maritime de manière respectueuse. Le bateau est une extension de l'humain pour évoluer en mer, il se doit donc de choisir son bateau en fonction de son potentiel impact, de ses matériaux etc...

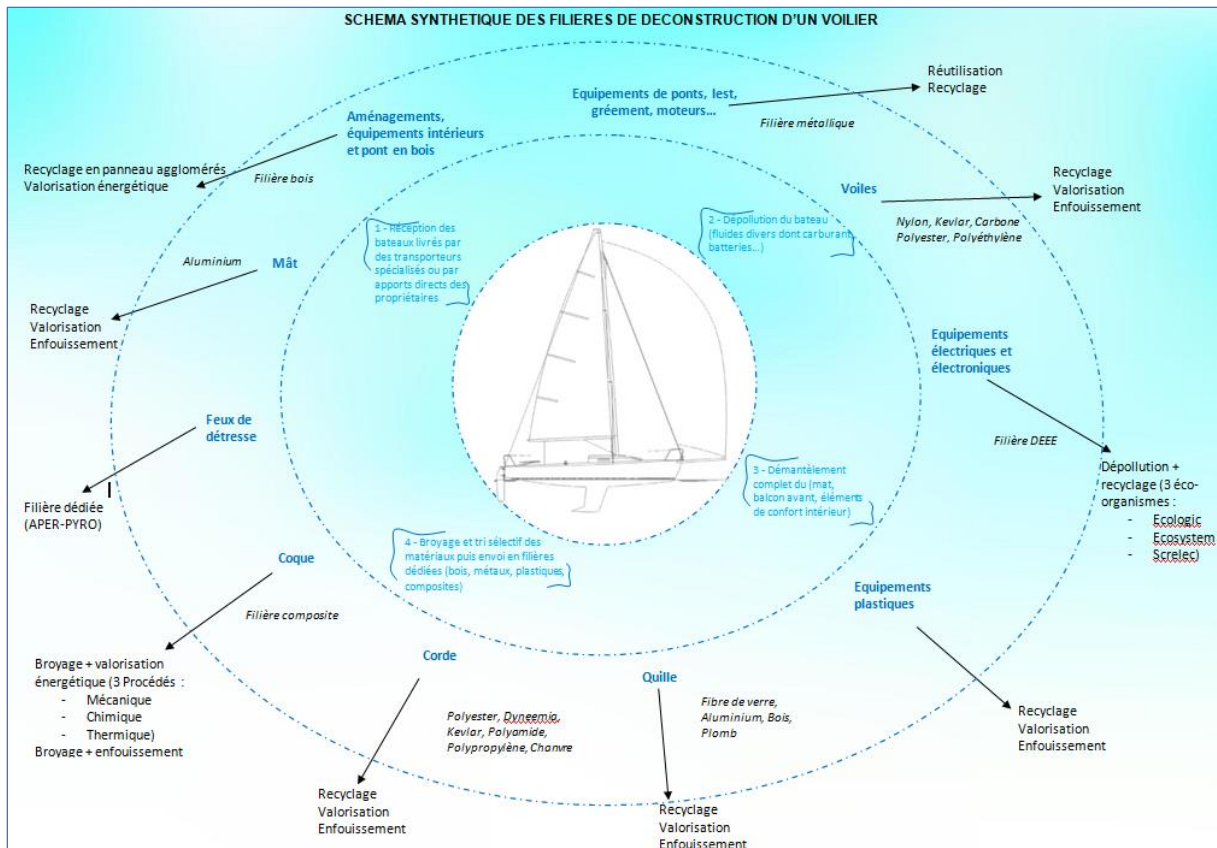


Figure 69 : Schéma synthétique des filières de déconstruction

## VII. Les prochaines étapes du projet :

Dans une perspective d'amélioration de ce projet nous pourrions contacter les étudiants ou les professeurs de l'école d'architecture navale de Southampton au Royaume-Uni afin d'échanger sur ces sujets.

De plus, lors de la manifestation *Les Nauticales* à la Ciotat, nous avons échangé au sujet du biomimétisme avec un exposant. Le biomimétisme est un processus innovant qui s'inspire des êtres vivants, de la matière et de la nature avec pour objectif la création de nouveaux outils et l'aide à la résolution de problèmes actuels. C'est ainsi que le velcro est inspiré de plantes disposant de propagules munies de crochets menus et souples, comme la plante « benoîte commune » (*Geum urbanum*). On retrouve d'autres exemples comme la forme de l'avant des trains, celle-ci est inspirée du bec du martin pêcheur pour mieux appréhender les surpressions à l'entrée des tunnels. En effet, le martin-pêcheur ne perd pas sa vitesse lorsqu'il rentre dans l'eau. [WIKIPEDIA]

## VIII. Bibliographie :

[727SAILBAGS] : <https://www.727sailbags.com/fr/>

[ADEME] : Deloitte Développement Durable (Véronique MONIER, Mathieu HESTIN, Manuel TRARIEUX, Alexis LEMEILLET, Marie LAROCHE), Nautique Conseil (Vianney DUPONT) et Horizons Experts (Gérard MAUMENEE) – 2016 – Etude préalable à la mise en place de la filière de collecte et de traitement des navires de plaisance ou de sport hors d'usage sous la responsabilité des producteurs (REP) – Rapport – 187 pages.

[ADT HERAULT] : Le marché de la plaisance en France. Mieux comprendre les pratiques, les besoins et les attentes des plaisanciers, <http://www.adt-herault.fr/docs/578-1-atout-france-le-marche-de-la-plaisance-en-france-pdf.pdf>

[APER] : [recyclermonbateau.fr](http://recyclermonbateau.fr)

[ARCOMPOSITES] <https://www.arcomposites.com/>

[BATHO] <https://www.batho.fr/>

[BESUSTAINABLE] <https://besustainable.brussels/>

[BOURGUINAT] Pierre-Marie Bourguinat, P-M B. (2010). Le sandwich : à boire et à manger, <https://voilesetvoiliers.ouest-france.fr/industrie-nautique/chantiers/le-sandwich-a-boire-et-a-manger-40419410-83db-f048-acf8-08f8418390fa>

[COAT, 2017] Gwalaz, un brin d'herbe dans une coque en lin, Tanguy Coat, (2017), <http://www.eco-bretons.info/gwalaz-brin-dherbe-coque-de-lin/>

[CORDAGE] Bien choisir la matière de son cordage : quelle fibre pour quel usage ?, (2019). <https://www.meyersansboeuf.com/blog/nautisme/differentes-matieres-fibres-usages-cordage-bateau/#lightbox/0/>

[COURSEAULARGE, 2016] Première mondiale : fabrication d'un bateau en composite thermoplastique recyclable, (2016), <https://www.courseaularge.com/premiere-mondiale-fabrication-dun-bateau-composite-thermoplastique-recyclable.html>

[CRECOF, 2017] Crecof, Guide de recyclage des composites, (2017), <https://www.autoplasticgate.fr/wp-content/uploads/2017/03/CRECOF-Guide-du-Recyclage-des-Composites.pdf>

[DUSSOL, JAOUEN] La fin de vie des navires : démantèlement, recyclage ?, Jacques Dussol, Bertrand Jaouen. (2011). <https://www.inter-mines.org/fr/revue/article/la-fin-de-vie-des-navires-demantelement-recyclage/1150>

[ECOCHARD, 2019] : Elaboration de polymères 100% biosourcés pour matériaux composites à impact environnemental réduit, Yvan Ecochard, (2019), <https://www.theses.fr/2019MONT070>

[ECOLOGIE.GOUV] Ministère de la transition écologique, <https://www.ecologie.gouv.fr/lecologie-industrielle-et-territoriale>

[FICHOT, 2021] : Entretien. Les voiliers du futur sans doute construits aussi en fibres d'orties, Nicolas Fichot, (2021), <https://voilesetvoiliers.ouest-france.fr/environnement-littoral/ecologie/entretien-les-voiliers-du-futur-sans-doute-construits-aussi-en-fibres-d-orties-ccd68748-cdea-11eb-baa9-ef1451863c79>

[FRANCETVINFO] Inde : des chantiers navals de demolition qui font scandale, (2019). [https://www.francetvinfo.fr/economie/transports/chantiers-navals-de-saint-nazaire/inde-des-chantiers-navals-de-demolition-qui-font-scandale\\_3505729.html](https://www.francetvinfo.fr/economie/transports/chantiers-navals-de-saint-nazaire/inde-des-chantiers-navals-de-demolition-qui-font-scandale_3505729.html)

[FIDH] Les bateaux en fin de vie – le coût humain de la demolition des navires, (2005). <https://www.fidh.org/fr/regions/asie/inde/Les-bateaux-en-fin-de-vie-le-cout,2912>

[GARIN] Indre : des pompiers isolent leur caserne avec leurs vieilles tenues, Virginie Garin. (2019). <https://www.rtl.fr/actu/debats-societe/indre-les-pompiers-recyclent-leur-vieilles-tenues-en-isolant-7797886287>



[GOUV] La plaisance en chiffres, <https://www.mer.gouv.fr/sites/default/files/2020-11/Statistiques%20plaisance%202020.pdf>

[HADJER, 2011] Recyclage des matériaux composites thermodurcissables à usage naval, Hadjer, B., (2011). <http://docplayer.fr/29601525-Recyclage-des-materiaux-composites-thermodurcissables-a-usage-naval.html>

[J80] : Fiche technique J80, <https://www.boat-specs.com/sailing/fr/voiliers/j-boats/j-80>

[KAIROS] Kairos environnement, <https://www.kairos-jourdain.com/fr/environnement#produits>

[LANE, 2019] Cet été, offre-vous une nuit en bateau dans une auberge insolite des quartiers Nord, Hugo Lane, (2019), <https://madeinmarseille.net/45541-chambre-insolite-bateau-quartiers-nord/>

[LE DIGABEL-HOULLIER, 2004] : Incorporation de co-produits de paille de blé dans des matrices thermoplastiques : approche de la comptabilité charge-matrice et propriété des composites : thèse pour le doctorat en sciences spécialité Chimie des matériaux, Frédérique Le Digabel-Houllier, (2004), <https://www.theses.fr/2004REIMS016>

[LEFEVRE et al] Observation de la mer par apprentissage profond : quelques exemples d'applications pour protéger notre bien commun., S. Lefèvre<sup>1</sup>, L. Courtrai<sup>1</sup>, M.T. Pham<sup>1</sup>, C. Friguet<sup>1</sup>, J.C. Burnel<sup>1</sup>. Université Bretagne Sud, Institut de Recherche en Informatique et Systèmes Aléatoires (UMR CNRS 6074) Campus de Tohannic, 56000 Vannes, France, [https://www.researchgate.net/profile/Christine-Chauvin/publication/351634548\\_Mer\\_et\\_littoral\\_un\\_bien\\_commun/links/60a35f1fa6fdccb8dc621e96/Mer-et-littoral-un-bien-commun.pdf#page=189](https://www.researchgate.net/profile/Christine-Chauvin/publication/351634548_Mer_et_littoral_un_bien_commun/links/60a35f1fa6fdccb8dc621e96/Mer-et-littoral-un-bien-commun.pdf#page=189)

[LEGIFRANCE] : <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000038190390>

[LESREGATES.COM] : Présentation de la Flotte Monotype J80, <https://www.lesregates.com/les-j80/presentation-de-la-flotte#:~:text=Pr%C3%A9sentation%20de%20la%20Flotte%20Monotype%20J80&text=D%27abord%20limit%C3%A9%20%C3%A0%205.les%20plus%20importantes%20de%20France.>

[Le processus de dépolymérisationMERLET, 2021] Korec : Un processus de dépolymérisation pour revaloriser les déchets composites, Briag Merlet, (2021), <https://www.boatindustry.fr/article/36078/korec-un-processus-de-depolymerisation-pour-revaloriser-les-dechets-composites>

[MERLET, 2019] GreenBoats : une reflexion globale sur les bio-composites, Briag Merlet, (2019). <https://www.boatindustry.fr/article/30176/greenboats-une-reflexion-globale-bio-composites>

[MINISTERE] Ministère de la transition écologique et solidaire

[MONTI, 2016] Elaboration et caractérisation mécanique d'une structure composite sandwich à base de constituants naturels, Arthur Monti, (2016), [https://www.researchgate.net/publication/313437109\\_Elaboration\\_et\\_caracterisation\\_mecanique\\_d'une\\_structure\\_composite\\_sandwich\\_a\\_base\\_de\\_constituants\\_naturels](https://www.researchgate.net/publication/313437109_Elaboration_et_caracterisation_mecanique_d'une_structure_composite_sandwich_a_base_de_constituants_naturels)

[NAUTISME] : [file:///C:/Users/s721528/Downloads/2020\\_ORM\\_HCNautisme\\_HDRRegion%20.pdf](file:///C:/Users/s721528/Downloads/2020_ORM_HCNautisme_HDRRegion%20.pdf)

[NC, 2020] Comment favoriser l'éco-conception des bateaux de plaisance, que ce soit pour les matériaux de construction utilisés ou pour la déconstruction en fin de vie ?, (2020), <https://nc.campus-metiers-occitanie.fr/2020/07/02/comment-favoriser-leco-conception-des-bateaux-de-plaisance-que-ce-soit-pour-les-materiaux-de-construction-utilises-ou-pour-la-deconstruction-en-fin-de-vie/>

[NOUIGUES] – Nouigues Arbia, NA. (2021). Recyclage des pièces en composite polyester en fibres de verre de grandes dimensions par laminage. <file:///C:/Users/926804/Downloads/NOUIGUES.pdf>

[OPALIS] Façade du Conseil Européen et du Conseil de l'UE, <https://opalis.eu/fr/projets/facade-du-conseil-europeen-et-du-conseil-de-lue>

[OSMOSE] L'osmose des coques plastiques, <http://seme.cer.free.fr/plaisance/osmose-coques-plastiques.php>

[OUESTCOMPOSITES] Injection RTM Light / Infusion : Quelles sont les différences ?, Ouest composites, <https://www.ouest-composites.com/2021/04/09/injection-rtm-light-infusion-queelles-sont-les-differences/>

[PATAGONIA] Recycled nylon, <https://www.patagonia.com/our-footprint/recycled-nylon.html>

[RECYCLAGEDUNYLON] Transformation des fibres de nylon en granulats, <https://www.cioa-manche.com/cnt/gt/recyclage-du-nylon-3916-48260-cat.html>

[RECYCLINGCARBON] Vapo-thermolyse, <https://www.recycling-carbon.org/services/vapo-thermolyse/>

[ROBINDESBOIS] Robin des bois, <https://robindesbois.org/robindesbois/>

[SCALVO]: Recyclez vos bateaux en fin de vie, Groupe Sclavo, <https://www.groupe-sclavo.fr/wp-content/uploads/2016/02/PLAQUETTE-E%CC%81CO-NAUTIQUE-GROUPE-SCLAVO-ENVIRONNEMENT.pdf>

[SCHWANDER] Solutions pour le recyclage des composites, verrous et opportunités, Schwander., M., [https://www.mecamat.asso.fr/Aussois/2014/res/Schwander\\_com.pdf](https://www.mecamat.asso.fr/Aussois/2014/res/Schwander_com.pdf)

[SYLVIA] Voiles et matières, Sylvia. (2015). <https://la-couleur-necessaire.com/voiles-et-matieres/>

[THEGOODGOODS] Aramide, Qu'est-ce que l'aramide ?, <https://www.thegoodgoods.fr/matieres/aramide/>

[TORTERAT, 2016] 6 voiliers laboratoire pour tester des tissus bio-sourcés, Chloé Torterat, (2016), <https://www.bateaux.com/article/23264/6-voiliers-laboratoire-tester-tissus-bio-sources>

[WIKIPEDIA] : La démolition navale [https://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9molition\\_navale#En\\_France:\\_installation\\_class%C3%A9e\\_pour\\_la\\_protection\\_de\\_l%27environnement](https://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9molition_navale#En_France:_installation_class%C3%A9e_pour_la_protection_de_l%27environnement)

[WIKIPEDIA] : Moulage au contact, Wikipedia, [https://fr.wikipedia.org/wiki/Moulage\\_au\\_contact](https://fr.wikipedia.org/wiki/Moulage_au_contact)

[WIKIPEDIA] : Le biomimétisme

[XCRUSHER] Xcrusher, un pari urgent pour l'avenir, <https://www.xcrusher.fr/fr/presentation/>

[ZAMPROGNO, HOURCOURIGARAY, 2012] : Nautisme et composites bio sourcés, Christèle Zamprogno, Pierrick Hourcourigaray (2012), [http://www.voiles-alternatives.com/documents/mat/Lettre-de-Veille6\\_nautismeetcomposites-12.pdf](http://www.voiles-alternatives.com/documents/mat/Lettre-de-Veille6_nautismeetcomposites-12.pdf)

## IX. Remerciements

Ce projet a été réalisé en partenariat avec l'association Voile de l'Énergie et Environnement (VEE), nous remercions tous les membres de l'équipe, notre tutrice Aurélie Bringer, Georges Seimandi, Marc Frilet, Fabrice Maurin.

Nous remercions chaleureusement l'architecte naval, Eric Jean, pour toutes les informations pertinentes qu'il nous a partagé.

Nous souhaitons remercier également l'entreprise de composites Aéro Composites Saintonge d'avoir pris le temps de répondre à nos questions.

Pour finir, nous remercions l'initiateur de ce projet, notre tuteur école Patrick Pujo, ainsi que le Mastère ECOD et l'école de Polytech Marseille.