



Cahier technique de l'éconavigation

Volet 1 **« Bateaux et Equipements »**

Décembre 2010



Contact :

Bertrand Jaouen
Responsable du projet cahier des charges
Réseau EcoNav
bertrand@econav.org ; 02.98.75.31.86

Mot d'introduction

70 % de la surface de la planète est recouverte par les océans. Avec 11 millions de kilomètres carrés, la France dispose aujourd'hui du second domaine maritime mondial derrière celui des Etats-Unis. C'est une grande responsabilité pour le pays qui doit donc devenir un acteur maritime exemplaire notamment en termes de navigation durable.

Aujourd'hui les différentes activités maritimes sont en croissance constante et pèsent de plus en plus lourd sur un milieu naturel fragile. Pourtant la pérennisation de nombreux secteurs d'activité (tourisme, pêche, nautisme...) dépendent de l'avenir de la qualité de l'environnement côtier.

Il est donc plus que nécessaire de re-réfléchir nos activités marines afin de limiter nos impacts.

C'est pour cela que nous avons lancé le concept d'**Econavigation**.

L'objectif de ce cahier technique est de répertorier et d'analyser les différentes alternatives existantes et les projets en cours de recherche ou de développement, allant dans le sens d'une navigation durable. Malgré la grande attention portée à la rédaction de ce document, cet état des lieux ne peut être totalement exhaustif. Ce document sera donc amené à évoluer au fur et à mesure des avancées réalisées dans le domaine de l'éconavigation.



©F.Bassemayousse

L'éconavigation

L'éconavigation est le terme générique regroupant l'ensemble des options écologiques pour la construction, l'utilisation, l'accueil et la fin de vie des bateaux de pêche, de plaisance, de transport et de service. L'éconavigation est une démarche responsable qui concerne l'ensemble des usagers et acteurs économiques de la mer. L'éconavigation œuvre pour que le concept de durabilité soit au centre des décisions qui sont prises dans les différents secteurs maritimes et incite usagers et professionnels à promouvoir et à développer des solutions plus propres.

Le réseau EcoNav

Le réseau EcoNav, dont l'objectif principal est le développement de l'éconavigation, rassemble des institutions, des collectivités, des chercheurs, des industriels, des associations et des professionnels de la mer et du littoral.

Un tel réseau permet une concertation efficace pour l'élaboration de campagnes de sensibilisation à l'éconavigation destinées à l'ensemble des usagers et professionnels de la mer. Il constitue aussi une plate-forme pédagogique, d'information et de formation et renseigne usagers et professionnels en fournissant contacts, liens et conseils techniques.

EcoNav a l'ambition de fédérer idées, actions et projets au sein d'une même dynamique porteuse de solutions nouvelles, accessibles au plus grand nombre possible d'usagers et de professionnels du monde maritime.

Remerciements

Nos remerciements s'adressent tout d'abord aux membres du groupe de travail « bateaux équipements », pour leurs compétences et les discussions enrichissantes que nous avons eues ainsi que pour le temps investi sur ce projet. (Cf. Annexe : membre du groupe de travail)

Nous tenons également à remercier l'équipe d'EcoNav pour leur aide au quotidien et les nombreuses personnes ressources pour avoir partagé, avec nous, leurs connaissances. (Cf. Annexe : personnes ressources)

Nous remercions particulièrement les nombreux partenaires qui soutiennent ce projet : le MEEDDM dans le cadre du programme Recherche et expertise pour piloter ensemble la recherche et l'expertise (REPERE), la région Bretagne dans le cadre du projet ASOSC, l'ADEME Bretagne, l'Agence des Aires Marines Protégées, la Macif...

Plus généralement, nos remerciements touchent l'ensemble des membres du réseau EcoNav et des différents acteurs de l'éconavigation qui permettent de montrer ou de démontrer que nous pouvons naviguer d'une manière plus durable et moins impactante sur l'environnement.



Sommaire

Présentation de la démarche	7
Présentation Générale	7
Description du volet 1 « Bateaux et Equipements »	8
Caractéristiques du cahier des charges	11
Principe du développement durable.....	11
Eco-conception et Analyse du Cycle de Vie d'un produit.....	12
Origine et transports des matériaux et des produits	13
Caractéristiques des matériaux utilisés.....	13
Optimisation du poids	13
Durée de vie (structure, finitions, équipements)	14
Respect de la santé des opérateurs et des utilisateurs	14
Analyse des différentes alternatives proposées	14
Chapitre 1 - Construction	15
Fabrication des structures (coques et ponts)	15
Matériaux composites.....	15
Bois	31
Aluminium	39
Acier	43
Aménagement intérieur (isolation, décoration, sellerie...).....	47
Matériaux d'isolation et de décoration.....	47
Sellerie.....	49
Architecture	51
Résistance à l'avancement	51
Caractéristiques de la simulation numérique	52
Exemple de procédés pour optimiser le rendement de la carène	52
Gestion de l'environnement dans les chantiers	55
Gestion globale de l'environnement	55
Certification environnementale dans un domaine précis	56
Exemple d'initiatives environnementales dans les chantiers navals	57
Eco-conception et Analyse du cycle de vie d'un produit.....	59

Chapitre 2 - Propulsion, Equipements et Entretien	63
Propulsion	63
Propulsion Vélique	63
Propulsion Thermique	66
Propulsion Electrique	73
Propulsion Hybride	78
Solutions Alternatives	83
Energie du bord	87
Production d'énergie à bord	87
Réduction consommation d'énergie	97
Calcul du bilan énergétique	100
Batteries	101
Equipements pour la gestion des nuisances issues de l'exploitation des navires : déchets, eaux usées... ..	107
Gestion des eaux usées	107
Gestion des déchets solides	116
Antifouling	119
Autres facteurs d'impacts environnementaux	127
Produits d'hygiène et d'entretien	127
Mouillage	129
Vêtements de mer	130
Chapitre 3 - Fin de vie	131
Gisement	131
Techniques de démantèlement actuelles et futures	135
Moyens administratifs	141
Chapitre 4 - Autres valeurs de l'éconavigation	143
Ethique	143
Innovation	143
Nuisances diverses (bruit, vagues...)	144
Accessibilité personnes à mobilité réduite	144
Divers	145
Conclusion	147
Annexes	149

Présentation de la démarche

Plusieurs associations ou organisations professionnelles, soucieuses d'améliorer le comportement écologique et la prise en compte de l'environnement dans leurs métiers, ont élaboré et publié des recommandations, des chartes, des cahiers des charges, qui vont dans le sens de l'éconavigation. Certaines règles concernent plus particulièrement la plaisance, d'autres la pêche, les chantiers ou les ports.

Elles sont plus orientées sur la prise de conscience et sur un changement de pratique des personnes. Peu de ces règles s'appuient sur des options techniques. Les logos, marques, labels, propres à chaque activité, se multiplient. Il est aujourd'hui nécessaire de réfléchir à une mutualisation de ces approches et à un système de certification plus lisible et plus global, prenant en compte l'ensemble du concept d'éconavigation. Pour répondre à cette demande EcoNav a donc décidé de créer le projet de cahier des charges de l'éconavigation.

Présentation Générale

Le cahier des charges de l'éconavigation est un projet « phare » du réseau EcoNav.

Son objectif principal est d'augmenter la lisibilité de l'ensemble des alternatives et projets existants allant dans le sens d'une navigation durable.

Nous souhaitons également par cette démarche encourager une dynamique éco-responsable de l'ensemble de la filière maritime et des usagers.

A travers ce cahier des charges 3 grands volets sont abordés :

- Bateaux et Equipements :

Dans le volet « Bateaux et Equipements », nous nous intéressons au bateau tout au long de son cycle de vie, de sa construction à sa gestion en fin de vie, en passant par ses équipements et son entretien, puis nous présentons les différentes alternatives moins impactantes pour l'environnement.

- Pratiques et Comportements :

Dans le volet « Pratiques et Comportements » nous nous intéressons directement aux propositions d'évolution comportementale des acteurs de la filière maritime dans leurs activités à terre et en mer.

- Ports et abris :

Dans le volet « Ports et abris » nous nous intéressons aux infrastructures et aux équipements, permettant l'accueil et le stockage du bateau, ainsi qu'aux services proposés dans une optique de développement durable.

Dans un premier temps, le réseau EcoNav a majoritairement travaillé sur le volet « Bateaux et Equipements ». Ce premier rapport présente donc un état des lieux des alternatives existantes autour de cette thématique.

Vous trouverez une description de l'avancement des deux autres volets en annexes.



Description du volet 1 « Bateaux et Equipements »

Les objectifs

L'objectif de ce projet est de permettre au public d'évaluer et d'apprécier le niveau écologique d'un bateau équipé et d'encourager un comportement éco-responsable de la part des industriels et des consommateurs.

Ce projet permettra de créer un référentiel de l'Econavigation s'appuyant sur des options techniques socio-économiques et environnementales en vue de la mise en place d'un label de l'éconavigation.

Plan d'action volet « Bateaux et Equipements »

Notre plan d'action se déroule en **trois grandes étapes** :

1. Répertorier et analyser les technologies actuelles et les différentes alternatives proposées par l'éconavigation
→ **Rédaction d'un cahier technique mis à jour régulièrement**
2. Etablir un système d'évaluation de ces alternatives sur un bateau équipé
→ **Etablissement d'une grille d'évaluation.**
3. Valoriser ces alternatives proposées par l'éconavigation
→ à travers un système de garantie : **cahier des charges et certification indépendante couplée à un label**
→ **à travers des campagnes de sensibilisation et d'information vers les différents acteurs de la filière**

Pour cela, nous avons constitué un **groupe de travail d'une douzaine de personnes (cf. Annexes)**

Nous souhaitons que l'ensemble des parties prenantes soit associé au processus d'élaboration des règles du cahier des charges afin de créer un véritable dialogue.

C'est pour cette raison que ce groupe de travail est constitué de chercheurs, d'industriels, d'associations de défense de l'environnement et d'acteurs du milieu maritime afin de définir les critères acceptables par tout le monde.

Spécificité du cahier technique

L'objectif de ce cahier technique, présenté dans ce rapport est de répertorier les différents projets existants, en cours de recherche ou de développement, allant dans le sens d'une navigation durable.

Chacune de ces alternatives est analysée en fonction de son impact environnemental, de sa faisabilité technico économique et de son acceptabilité sociale.

A travers ce cahier technique nous avons souhaité présenter des alternatives existantes dans l'ensemble des secteurs maritimes. En effet EcoNav se veut être un réseau collaboratif avec une synergie des différents secteurs.

Elaboration d'une grille d'analyse

En parallèle de ce cahier technique, EcoNav travaille à l'élaboration d'une grille d'analyse du caractère éconautique d'un bateau équipé afin de définir les critères du futur label EcoNav.

Courant 2010, certains critères ont été identifiés et ont permis d'évaluer de manière expérimentale différents bateaux équipés. L'année 2011 servira à tester, améliorer, et à moduler ces critères en fonction du type de bateau et du programme de navigation.

Nous avons tout d'abord travaillé à l'élaboration d'une grille d'analyse plutôt orientée plaisance. Cette grille d'analyse comporte de nombreuses arborescences en fonction du type de bateau et du programme de navigation.

A travers notre démarche nous avons tenu compte de nombreux facteurs qui permettent d'apprécier le véritable impact environnemental d'un produit. Parmi ces facteurs nous nous sommes intéressés à l'éco-conception et l'analyse du cycle de vie d'un produit et plus spécifiquement à :

- l'origine des matériaux
- le caractère renouvelable des produits
- l'optimisation du poids
- la durée de vie
- le caractère recyclable des produits en fin de vie
- la santé des opérateurs et des utilisateurs
- l'adéquation du programme de navigation et l'équipement du bord
- mise en avant du « bon sens écologique »

Nous voulons établir un système de notation clair, compréhensible, précis, accepté et qui doit correspondre à un avantage écologique de chaque élément évalué. Ce système d'évaluation sera à points positifs, dans le but de récompenser les initiatives respectueuses de l'environnement et non de pénaliser. Le respect d'un pourcentage établi (éventuellement progressif), des règles du cahier des charges permettra de définir le caractère éconautique d'un navire.

Evaluation, certification et labellisation

Nous souhaitons baser notre système de certification sur les principes suivants :

- le principe « **d'obligation de moyens** » (et non sur une approche d'obligation de résultats). Les personnes désirant répondre au cahier des charges devront faire de leur mieux (limites économiques, techniques...) avec la mise en œuvre de moyens spécifiques. L'addition de choix « écologiques » présentés dans le cahier des charges sera valorisée. L'évaluation qualitative et quantitative de ces choix opérés pourra permettre d'évaluer et de noter le caractère éconautique d'un navire. Un niveau de points minimum sera déterminé en 2011 pour donner accès à la labellisation.

- **la concertation** entre l'ensemble des parties prenantes.

- **le libre accès** : tout demandeur potentiel doit pouvoir participer au processus d'élaboration d'un cahier des charges et tout demandeur, qui atteint le niveau requis par le cahier des charges, est autorisé à s'en servir commercialement. La démarche **reste volontaire**.

- **le caractère évolutif des exigences** : il est indispensable afin de garantir les performances environnementales et l'attractivité du cahier des charges. Il prend en compte le progrès scientifique, l'évolution technologique et l'évolution des demandes techniques et sociétales des usagers et bénéficiaires.

- **la certification par tierce partie** : les bateaux et leurs équipements seront jugés par des organismes tiers indépendants. Une séparation des fonctions évaluation par un organisme tiers et décision par un comité de certification sera clairement définie.

Remarques : A l'heure du boom écologique, de l'économie verte, les entreprises multiplient les actions de communication, rendant souvent difficile et confus le choix du consommateur. Le caractère réellement « éco » d'un produit ou d'un service est parfois si relatif qu'il est bien difficile de savoir si l'on soutient vraiment la bonne cause.

Dans ce contexte, le principe de certification et de labellisation d'un produit, effectué par un organisme sérieux et indépendant à partir d'un cahier des charges adapté, est l'unique solution pour donner au consommateur une réelle lisibilité sur le caractère écologique de son achat.

Le lancement officiel de ce label est prévu pour l'année 2012.

Les principaux avantages d'une certification écologique d'un navire

Les avantages envisageables pour les constructeurs ou les propriétaires désirant vendre leur bateau, sont un atout pour la vente et la perspective d'envisager un bonus écologique pour les bateaux neufs comme cela est le cas pour les voitures neuves.

Les avantages envisageables pour les plaisanciers, pêcheurs, armateurs sont:

- plus de lisibilité sur les achats (impact environnemental des bateaux...)
- reconnaissance de ses actions en faveur de l'éconavigation par l'affichage d'un logo
- des avantages en services ou tarifs préférentiels dans certains ports
- un tarif préférentiel auprès de certaines assurances
- l'éventuelle possibilité d'une exonération totale ou partielle de l'acte de francisation

Suivi de l'état d'avancement des travaux par un organisme tiers

L'avancée des travaux sera soumise au groupe de travail « bateaux et équipements » (dont l'Université de Bretagne Sud), à notre Comité Conseil (dont l'ADEME, la région Bretagne et l'Agence des Aires Marines Protégées), à nos partenaires (dont la Fondation Nicolas Hulot, la MACIF...) ainsi qu'à des personnes ou organismes spécialistes des différentes thématiques abordées.

Nous souhaitons que notre travail soit également soumis à un organisme de contrôle et de certification (Bureau Veritas, Ecocert, Socotec ...)

Comme indicateurs nous prendrons en compte : l'attractivité de ce cahier des charges pour les professionnels, sa clarté, son niveau de précision et son réalisme compte tenu des avancées des écotechnologies de la filière.



© Gildas Hémon/ Kerys

Caractéristiques du cahier des charges

La démarche que nous mettons en place est basée sur le principe de développement durable en prenant en considération les impacts environnementaux mais également économiques et sociaux des activités maritimes. Nous nous intéresserons à l'ensemble du cycle de vie du navire de sa construction à sa gestion en fin de vie en passant par son utilisation, ses équipements et son entretien.

A travers notre démarche nous tiendrons également compte des facteurs suivants :

- l'éco-conception et l'analyse du cycle de vie d'un produit
- l'origine des matériaux
- le caractère renouvelable des produits
- l'optimisation du poids
- la durée de vie
- le caractère recyclable des produits en fin de vie
- la santé des opérateurs et des utilisateurs
- la sobriété
- mise en avant du « bon sens écologique »

Principe du développement durable

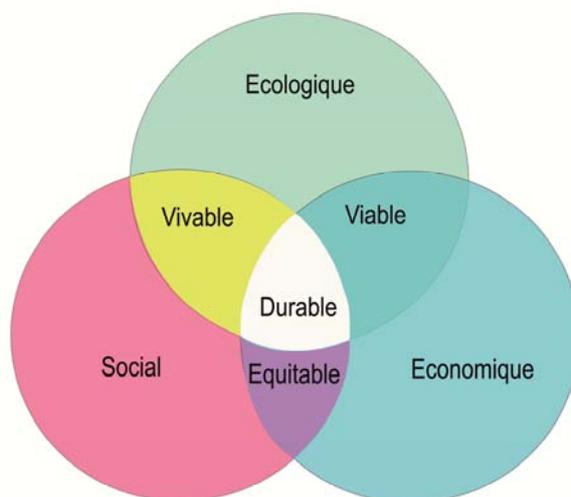
Selon la définition proposée en 1987 par la Commission mondiale sur l'environnement et le développement dans le rapport Brundtland, le développement durable est :

« Un développement qui répond aux besoins des générations du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs ».

Un tel développement doit prendre en compte 3 dimensions indissociables :

- l'économie
- le social
- l'environnement

Seul un développement tenant compte de ces trois piliers pourra être considéré comme durable.



Eco-conception et Analyse du Cycle de Vie d'un produit

L'éco-conception consiste en la prise en compte de l'impact environnemental d'un produit dès sa conception. Il est important d'agir le plus en amont possible afin d'avoir une véritable approche préventive des impacts sur l'environnement.

Les raisons pour lesquelles les entreprises s'engagent dans une démarche d'éco-conception sont les suivantes :

- Anticipation de l'évolution de la réglementation
- Répondre à l'évolution du marché
- Réduire les coûts pour l'entreprise
- Améliorer la performance et l'image de l'entreprise

Une des notions essentielles de l'éco-conception est l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) d'un produit.

L'ACV est une **méthode d'évaluation environnementale**¹ qui permet de quantifier les impacts d'un produit (qu'il s'agisse d'un bien, d'un service voire d'un procédé) sur l'ensemble de son cycle de vie, depuis l'extraction des matières premières qui le composent jusqu'à son élimination en fin de vie, en passant par les phases de distribution et d'utilisation. Outil normalisé et reconnu, l'ACV est la méthode la plus aboutie en termes d'évaluation globale et multicritère. Elle résulte de l'interprétation du bilan quantifié des flux de matières et énergies liés à chaque étape du cycle de vie des produits, exprimée en impacts potentiels sur l'environnement.



¹ Définition de l'analyse du cycle de vie par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), <http://www2.ademe.fr>

L'enjeu majeur de l'utilisation de l'ACV est d'identifier les principales sources d'impacts environnementaux et d'éviter ou d'arbitrer les déplacements de pollutions liés aux différentes alternatives envisagées. Cette meilleure connaissance des impacts associés aux produits peut permettre de hiérarchiser les priorités d'amélioration et d'éclairer les choix techniques et organisationnels dans une démarche d'éco-conception par exemple.

La conduite d'une telle évaluation peut également permettre de repérer et de valoriser les produits présentant les impacts les plus faibles dans une démarche d'écolabellisation, d'information des consommateurs, et de participer au développement de l'offre de produits de meilleure qualité écologique.

Favorisant une vision globale des impacts générés par les produits ou procédés, déclinée selon différentes simulations, l'ACV fournit ainsi des éléments d'aide à la décision aux politiques industrielles (choix de conception, d'amélioration de produits, choix de procédés) ou publiques (choix de filières de valorisation, critères d'écolabellisation de produits).

Origine et transports des matériaux et des produits

D'où viennent les matériaux ? Quelles sont leurs conditions d'exploitation ? Quels sont les impacts liés à leur transport ?

A matériau ou produit identique, les différences d'impacts environnementaux et sociaux peuvent être importantes en fonction de l'origine et des filières suivies avant d'arriver sur le chantier.

D'après une étude sur l'efficacité énergétique et environnementale du transport maritime réalisé par le ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire (MEEDDAT) et l'ADEME², les différences d'impacts environnementaux entre le transport de marchandise par porte conteneurs et par camions sont les suivantes :

Transport de marchandise par Porte conteneurs

Il faut savoir que 1 tonne de marchandises transportée sur 1km engendre le dégagement entre 7,8 et 26,6 g de CO2.

Transport de conteneurs par camion

Il faut savoir que 1 tonne de marchandises transportée sur 1km engendre le dégagement de 104.5 g de CO2

Il est donc nécessaire de privilégier des matériaux et des produits d'origine locale et de choisir des modes de transport les moins impactants possibles.

Caractéristiques des matériaux utilisés

A travers ce document nous souhaitons mettre en avant les matériaux et produits écologiques, biosourcés, renouvelables, recyclables ou compostables, demandant le moins d'énergie grise possible pour leur transformation.

Depuis de nombreuses années, l'industrie des matériaux et la production énergétique a été, essentiellement centrée sur la pétrochimie. Cette ressource présentait de nombreux avantages : disponibilité, faible coût, potentiel énergétique élevé.

Aujourd'hui la problématique n'est plus la même : le coût du pétrole a augmenté, sa disponibilité a diminué et de nombreux projets de recherche et de développements s'intéressent aux ressources dites renouvelables pour trouver des alternatives.

Beaucoup ne sont encore qu'au stade de l'expérimentation mais présentent des perspectives très intéressantes. Certains d'entre eux seront exposés dans ce rapport.

Optimisation du poids

Le bilan écologique étant proportionnel à la quantité de matériaux investis dans la construction, toute diminution de poids a un effet positif immédiat en termes d'impacts environnementaux (extraction, fabrication, fin de vie). Mais cette diminution de poids permet également de réduire la puissance nécessaire à la propulsion du bateau, et ainsi de réaliser des économies d'énergie et de matériaux durant la phase d'usage. Le poids peut donc être un sérieux handicap pour la performance, le budget et le bilan écologique. Il est nécessaire d'optimiser au mieux l'architecture propre du navire, ses équipements et son armement. La sobriété est donc à mettre en avant.

² Etude de l'efficacité énergétique et environnementale du transport maritime, Janvier 2009

Durée de vie (structure, finitions, équipements)

La durée de vie d'un navire est un critère essentiel. En effet, les impacts environnementaux générés sur l'ensemble de son cycle de vie, sont à rapporter à sa durée d'utilisation.

Ainsi, un navire qui présente un faible impact environnemental à sa construction mais dont la durée de vie est faible ne sera pas forcément plus intéressant qu'un second navire un peu plus polluant à la construction mais dont la durée de vie sera plus importante.

Exemple de durée de vie moyenne pour un voilier³ :

Coque en stratifié : de 30 à 50 ans

Coque en bois : 100 ans ou plus selon protection, entretien et/ou restauration

Coque en aluminium : 50 ans ou plus

Respect de la santé des opérateurs et des utilisateurs

Les durcisseurs et catalyseurs présents dans les résines et peintures modernes sont très toxiques. Ceux-ci libèrent des composés organiques volatils (COV) pendant et après leur mise en œuvre qui sont nocives pour les opérateurs à la fabrication et les utilisateurs des bateaux.

Certains fabricants proposent des produits à base de solvants et de résines dites « naturelles » adaptés principalement aux finitions intérieures. Toutefois qui dit « naturel », ne signifie pas innocuité (les poussières de bois ont un caractère cancérigène et peuvent occasionner des irritations des muqueuses).

Analyse des différentes alternatives proposées

Tout au long de ce rapport, chacune des alternatives sera proposée en fonction :

- de son **impact environnemental au sens large** (consommation des ressources, pollution atmosphérique, pollution des eaux, pollution des sols, santé humaine...) dans le cas d'un matériau ou produit
- de ses **performances environnementales** au sens large dans le cas d'un système de traitement d'une pollution
- de sa **faisabilité technico-économique** : possibilité de développer ce produit à grande échelle avec des performances techniques et un coût économique acceptables.
- de son **acceptabilité sociale** : l'étude des attitudes et des contraintes sociales et normatives conduisant les usagers à recourir effectivement à l'utilisation d'une technologie donnée

Des remarques seront également émises pour montrer l'importance de :

- **l'adéquation entre le programme de navigation** et le type, l'aménagement et l'équipement du bateau utilisé.
- **la prise en compte « bon sens écologique ».**

³ Magazine « Bateau », mars 2009

Chapitre 1 - Construction

Fabrication des structures (coques et ponts)

Matériaux composites



GENERALITES

Un matériau composite peut être défini d'une manière générale comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux, l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs.

On appelle maintenant de façon courante « matériaux composites » ou « stratifiés » des arrangements de fibres (les renforts) qui sont noyés dans une matrice dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible. Un troisième composant de faible densité, l'âme, peut être introduit entre deux « peaux » stratifiées. On parle alors de « composite sandwich ».

La matrice assure la cohésion et l'orientation des fibres. Elle assure la géométrie des pièces, protège les fibres du milieu ambiant, et permet de transmettre vers les fibres les sollicitations auxquelles elles sont soumises.

Les renforts, sous forme de fibres, contribuent à améliorer la résistance mécanique et la rigidité de la pièce dans laquelle ils sont incorporés.

La construction sandwich permet d'obtenir des composites très rigides tout en restant légers.

Une des particularités des composites est d'associer en une seule opération plusieurs matériaux de base pour produire simultanément la pièce et le matériau qui la compose.

Domaines d'application des « composites » en construction nautique

Les premiers bateaux construits en composites sont apparus dans les années 60.

Actuellement, plus de 90% des bateaux de plaisance sont construits en composites. Les applications vont de la barque aux grandes unités de plus de 60 pieds (aviron, voile ou moteur).

Mais les composites sont également largement répandus pour la construction de bateaux de travail et de servitude (pêche, vedettes de transport, remorqueurs, etc.), et d'éléments de bâtiments militaires (superstructures notamment).

Avantages / Inconvénients technico-économiques

L'avantage principal des composites à renforts fibreux est qu'ils permettent de définir des directions privilégiées de renforcement. En fonction des efforts à reprendre, le concepteur est potentiellement libre d'orienter les fibres de renfort comme il le souhaite. L'emploi de matériaux composites permet de produire avec un minimum d'opérations des bateaux de plaisance de formes complexes suffisamment rigides et légers.

L'usage des composites permet une grande flexibilité au niveau de la construction : design, conception, mode de production en fonction des volumes de fabrications, etc.

Globalement, on peut donc dire que les constructions en matériaux composites présentent les avantages suivants : légèreté, prix, obtention de formes complexes, pas de corrosion, etc.

Principales matrices utilisées en construction nautique

Polyesters insaturés

Les matrices polyester sont les plus utilisées en construction navale. Elles se présentent, à l'état de demi-produit, sous forme d'une résine (liquide visqueux) de polyester insaturé dissout dans un diluant réactif co-polymérisable contenant un monomère.

Lors de la mise en œuvre, on y ajoute un système catalytique qui permet la réticulation de la résine (à température ambiante). Nous obtenons finalement une matrice polyester solide infusible.

Les polyesters insaturés ont pour avantage, un faible coût (environ 2 €/kg), leur facilité de mise en œuvre et la rapidité de la co-polymérisation (réticulation, de l'ordre de 24 heures à température ambiante pour le durcissement).

Epoxydes

Les matrices époxydes ou époxy sont les matrices-type des composites hautes performances. Elles sont préférées lorsque le gain de poids est recherché et que le prix n'est pas un facteur déterminant.

Les époxy se présentent, à l'état de demi-produit, sous forme d'un système à deux composants, la résine époxyde (liquide visqueux), et le durcisseur (ou agent de réticulation), qu'on mélange lors de la mise en œuvre. Après réticulation, on obtient une matrice époxy solide infusible.

Suivant le type de résine époxyde, la réticulation se fait à température ambiante, ou à des températures plus élevées (120°C, 180°C, etc.).

Les avantages principaux des époxydes sont leur forte adhésion au renfort, et une bonne tenue mécanique. Cependant, leur coût reste élevé (environ 10€/kg), et selon le type, une montée en température est nécessaire.

Vinylesters

De par leurs formulations, les résines vinylester sont à mi-chemin entre les polyesters et les époxydes.

Elles se présentent également à l'état de demi-produit, sous forme d'un système à deux composants, la résine vinylester (liquide visqueux), et le catalyseur (ou agent de réticulation), qu'on mélange lors de la mise en œuvre. Après réticulation, on obtient une matrice vinylester solide infusible.

Les vinylesters ont pour avantages leur facilité de mise en œuvre (comparables aux polyesters), de meilleures performances mécaniques que les polyesters, une bonne résistance à la fatigue, ainsi qu'un excellent comportement à la corrosion.

Leur coût se situe entre les polyesters et les époxyes (environ 4€/kg).

Principaux renforts utilisés en construction nautique

Fibres de verre

Les fibres de verre sont les plus utilisées dans la construction de bateaux de plaisance.

En construction nautique ces fibres sont utilisées sous forme de mats (fibres courtes amalgamées aléatoirement), de tissus de verre (fibres longues tissées suivant plusieurs directions privilégiées), et de nappes unidirectionnelles ou bibiais (fibres longues cousues orientées suivant une ou deux directions).

La fibre de verre donne les renforts les plus économiques. Elle possède par ailleurs un excellent comportement en milieu humide, une bonne résistance aux agressions chimiques, sa mise en œuvre est facile et elle est compatible avec la plupart des matrices d'imprégnation.

La fibre de verre est pénalisée par une densité supérieure à celle d'autres types de renforcement.

Fibres de carbone

Le carbone entre progressivement dans la fabrication de coques de grandes unités. Les caractéristiques mécaniques de ces fibres hautes performances, notamment la rigidité, associées à une faible densité permettent d'alléger les structures et de gagner en vitesse et en stabilité.

Ces fibres sont aussi de plus en plus utilisées pour la fabrication de mâts et espars, voire de gréements courants (câbles, étais, etc.) Elles sont utilisées en construction navale sous forme de tissus et de nappes bibiais ou unidirectionnelles.

Les fibres de carbone présentent une très forte raideur axiale, une très bonne résistance aux attaques chimiques, ainsi qu'une meilleure durée de vie en fatigue que les fibres de verre. Néanmoins, les fibres de carbone ont un coût élevé.

Autres fibres

D'autres fibres comme celles d'aramide (ex. Kevlar) sont quelquefois utilisées en construction navale. Cela reste malgré tout relativement marginal. Leur principal avantage est leur forte résistance aux chocs, leur principal inconvénient étant leur caractère très hydrophile.

Principaux matériaux d'âme utilisés en construction nautique

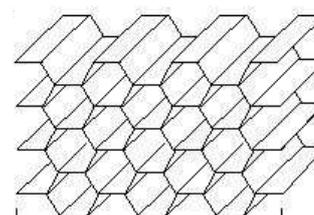
Nid d'abeille Nomex

Le matériau d'âme « Nomex » est utilisé majoritairement dans les applications hautes performances, où le prix n'est pas un facteur déterminant (prototypes de compétitions par exemple).

Il est fabriqué à partir d'une feuille à trame d'aramide trempée dans un bain de résine phénolique afin d'obtenir la densité désirée.

Il présente l'avantage, d'une faible densité pour une bonne résistance au cisaillement, ainsi qu'une facilité de mise en œuvre avec des peaux en préimprégnés (bonne résistance en température).

Hexagonal Cell



Mousses Polyvinyl chloride (PVC)

Bien qu'elles n'offrent pas les mêmes performances que le Nomex (rapport raideur/poids plus faible), les mousses PVC sont très utilisées pour les applications sandwich hautes performances, loin devant toutes les autres mousses cellulaires (cf. paragraphe « autres mousses »).

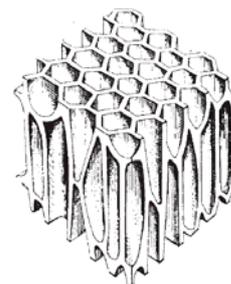
Les demi-produits utilisés en construction nautique sont des panneaux (épaisseurs jusqu'à quelques centimètres). Les densités courantes sont comprises entre 0,05 et 0,1 ($\rho = 50$ à 100 kg/m^3).

Les mousses PVC présentent comme avantages, un coût moins élevé que le nid d'abeille, une mise en œuvre nettement plus simple notamment au niveau du collage sur les peaux, et aussi la possibilité de conformer les panneaux de mousses sur des surfaces courbes.

Balsa

Le balsa est un arbre dont le bois est extrêmement léger et rigide. Sa production est difficile, car c'est un arbre complexe qui ne pousse que dans des conditions climatiques particulières et à une certaine altitude. Il est originaire d'Equateur et plus largement des régions équatoriales d'Amérique (centrale et latine). Le Balsa est un arbre à croissance très rapide.

Coupé dans la section du tronc (perpendiculairement au sens de pousse), il laisse apparaître une structure poreuse assez comparable à un nid d'abeille :



Dans cette configuration dite « bois de bout », le balsa est utilisé comme matériau d'âme depuis les années 60.

Les demi-produits utilisés en construction nautique sont des panneaux plats rigides ou conformables constitués de petits cubes de balsa (épaisseurs jusqu'à quelques centimètres). Les densités standards sont comprises entre 0,09 et 0,25 ($\rho = 90$ à 250 kg/m^3).

Le balsa a pour avantages:

- une très bonne résistance en compression et cisaillement
- une bonne résistance au feu (il conserve ses propriétés structurelles beaucoup plus longtemps que les mousses)
- d'être utilisable quelque soit le procédé de mise en œuvre (notamment avec pression et températures élevées)
- d'être un produit d'origine naturelle

Le Balsa présente cependant quelques inconvénients :

- maîtrise de la mise en œuvre des sandwichs parfois délicate (sensibilité aux conditions environnementales, timing, etc.)
- sensibilité aux impacts et à l'humidité qui fait qu'un bateau en sandwich balsa exigera plus d'entretien et de soin que ceux avec d'autres âmes.

Autres âmes

Les autres âmes que nous pouvons trouver en construction navale sont les suivantes :

- Mousse SAN : styrène acrylonitrile
- Mousses PS (polystyrène) et PU (polyuréthane)

Des recherches portent actuellement sur l'utilisation de **liège** comme âmes en construction nautique. Pour plus d'information sur le liège, se reporter au chapitre « aménagement intérieur ».

Avantages / inconvénients environnementaux

La plupart des matériaux mis en œuvre dans les constructions composites sont issus de la pétrochimie, ce qui induit : matières premières non renouvelables, procédés de fabrication impactants notamment d'un point de vue énergétique...

La part de matière recyclée utilisée est nulle.

Leur manipulation et leur mise en œuvre sont globalement impactantes sur la santé humaine. En effet, un problème majeur des matrices utilisées en construction nautique est qu'elles renferment des composés organiques volatiles, particulièrement nocifs pour la santé humaine. Ils sont notamment issus des solvants, comme le styrène par exemple, présent en grande quantité dans les résines polyester et vinylester.

D'un point de vue environnemental, pour les composites, 3 grands aspects seront analysés en fonction des matériaux utilisés.

1. Le caractère biosourcé des matériaux
2. La toxicité lors de la mise en œuvre pour l'homme et l'environnement
3. Le recyclage en fin de vie

Alternatives et pistes de recherche allant dans le sens d'une navigation durable

Au niveau des matrices

Des travaux de recherche sont menés depuis quelques années pour mettre au point des matrices moins impactantes sur la santé humaine et l'environnement.

Certains notamment, visent à réduire la toxicité des matrices, d'autres, à réduire l'usage de dérivés pétrochimiques comme matières premières des matrices.

Parmi les produits intéressants, développés à ce jour, on peut citer les résines polyesters à faible émission de styrène ou à faible teneur en styrène et les « Bio-époxy ».

Résines à faible émission de styrène

Comme évoqué précédemment, l'un des problèmes majeurs des matrices utilisées en construction nautique est qu'elles contiennent de grandes quantités de composés organiques volatils (COV).

Durant la dernière décennie, des normes environnementales européennes ont été mises en place pour réglementer les émissions de COV dans les chantiers de construction.

Les fournisseurs de résines ont donc proposé une réponse face à cette problématique et à ces contraintes en développant de nouvelles résines (essentiellement des polyesters, mais aussi des vinylesters) qui permettent de limiter les émissions de styrène lors des opérations de stratification : des résines à faible teneur en styrène, des résines à faible émission de styrène (elles contiennent des additifs qui bloquent les émissions), ou des formulations mixtes.

L'utilisation de ce type de résines est actuellement assez largement répandue dans les chantiers. L'impact sur la santé des opérateurs, essentiellement, s'en trouve diminué. Les autres problèmes environnementaux posés par l'usage de matériaux composites demeurent.

Bio-époxy

Depuis quelques années, nous voyons se développer de nouvelles formulations de résines époxy, avec pour objectif principal de réduire l'utilisation de dérivés du pétrole pour leur fabrication.

Dragonkraft⁴ a développé un produit à base d'huile de lin époxyfiée et d'un durcisseur naturel : l'EcoPoxy.

Le durcisseur ne contient pas de COVs ni de bisphénol. Dragonkraft pense avoir trouvé là, une alternative à l'époxy classique. Ce produit peut être utilisé avec des tissus de verre, du chanvre, du lin et du basalte.

Sicomin⁵ mène également des développements sur des résines époxy partiellement « biosourcées » pour réduire leur impact environnemental. Actuellement, la société commercialise la GreenPoxy 55, une résine dans laquelle la structure carbonée des chaînes polymères est en partie composée « d'atomes de carbone issus de la biomasse » (source : documentation commerciale Sicomin).

DragonKraft propose également **une résine qui durcit aux Ultra Violet**. Cette résine intitulée UV-L est fabriquée avec 96% de produits renouvelables et naturels et sans COV.

L'utilisation de matières premières biosourcées est effectivement une piste intéressante pour réduire les impacts environnementaux. Cela ne résout cependant pas le problème de la fin de vie de ces époxy (et de leurs composites), qui restent a priori non recyclables, et non biodégradables ou compostables.

Nous manquons d'ailleurs d'informations pour évaluer sérieusement les performances environnementales de ces produits. Il faut aussi valider leurs performances d'usage : mise en œuvre, caractéristiques mécaniques, durabilité, etc.

Nous attendons donc des retours d'expériences de l'application de ces produits en construction naval et des informations plus précises sur leur fabrication et les réductions réelles d'impacts que permettrait leur utilisation.

⁴ DragonKraft : Atelier spécialisé dans la création de projets faits sur mesure dans le respect du développement durable, http://www.dragonkraft.com/products_fr.html

⁵ Sicomin, <http://www.sicomin.com/>

Fibres d'origine végétale

Les fibres végétales constituent une alternative intéressante aux fibres synthétiques : elles sont issues de matières renouvelables, leurs procédés de fabrication sont globalement moins impactants sur l'environnement, leur manipulation ne pose pas de problème de santé humaine. Par ailleurs, en fin de vie, elles sont susceptibles de retourner à la terre (production de biomasse par compostage). Précisons que le composite réalisé avec des fibres végétales ne sera lui-même compostable que si la matrice l'est aussi.

Le lin, le chanvre, l'ortie et la jute sont aujourd'hui parmi les fibres végétales présentant le plus d'intérêts (propriétés mécaniques, durabilité, disponibilité agricole, etc.).

Aujourd'hui l'utilisation de fibres végétales, comme renfort est concevable sur des embarcations de petite taille ou sur certaines applications non structurelles constituant le bateau.

Leurs propriétés mécaniques sont encore trop limitées pour envisager sérieusement de construire les structures d'une grande unité de plaisance ou autre.

Si, l'exploitation des fibres végétales semble donc être une alternative à fort potentiel, il est important, cependant, de mettre en place une gestion durable et raisonnée de l'espace agricole nécessaire à leur culture. La notion de complémentarité avec les cultures alimentaire serait à envisager.

Parmi les recherches en cours concernant l'usage de fibres végétales pour des applications nautiques, on peut citer :

Le projet NavEcoMat, mené par la société Plasmor, l'Université de Bretagne Sud, l'IFREMER, le Groupe Finot, Catherine Chabaud, et Ahlstrom, vise à développer un matériau biocomposite hautes performances, constitué d'un support en fibres végétales et d'une matrice ou liant biodégradable, compatible avec les contraintes de fabrication et d'utilisation des petites unités de plaisance.

L'objectif est d'obtenir un biocomposite adapté à un usage structurel en milieu marin, susceptible de concurrencer le verre polyester, entièrement biosourcé recyclable et biodégradable en fin de vie. La piste privilégiée est un composite à base de renfort de lin et d'une matrice biosourcée, recyclable et compostable, le PLA (produit à partir d'amidon de maïs voire de pommes de terre). Un bilan d'impact environnemental est également réalisé afin de comparer cette solution à l'impact environnemental du verre/ polyester.



Projet NavEcoMat ; ©DR

La société Plasmor n'est pas la seule à s'intéresser au potentiel des fibres naturelles, des projets voient également le jour dans le domaine de la course au large.

Regis Garcia a choisi de construire en partenariat avec la société « Linéo », un mini 6.5 incorporant dans sa structure de la fibre de lin dans une matrice époxy.

Le chantier Grand Large Composites s'y intéresse également, tout comme la **société Kairos** de Roland Jourdain.

Au Bangladesh, un voilier nommé **Tara Tari**, composé de fibres de jute à hauteur de 40% vient d'être construit. Ce projet a pour objectif de proposer une alternative à la fibre de verre en démontrant le potentiel de la fibre de jute. Cette fibre est beaucoup moins chère que la fibre de verre. Elle permet de réaliser des bateaux sûrs, peu chers, durables et écologiques à la portée des pêcheurs du Golfe du Bengale. Du plus, elle constitue un espoir pour l'industrie menacée du jute au Bangladesh.⁶

ID COMPOSITE⁷ est un centre technique spécialisé en matériaux composites et polymères. ID composite intervient en conseil et veille technologique, formation et prestations techniques. Le centre technique s'appuie sur les moyens matériels et humains du département Science et Génie des Matériaux de l'IUT de St Brieuc (22). Leur objectif est de favoriser l'innovation et le développement technologique des PME – PMI des secteurs des matériaux composites et polymères du grand ouest. Pour cela ID composite accompagne notamment les entreprises dans la démarche d'éco-conception et l'utilisation de bio matériaux.



Projet Tara Tari ; ©DR

⁶ Projet Tara Tari, <http://tara-tari.blogspot.com/p/le-voilier-tara-tari.html>

⁷ ID Composite, www.idcomposite.fr

Caractéristiques Environnementaux des Matériaux Composites

		Matières première utilisées		Utilisation de matière recyclée	Coût énergétique de la fabrication	Impact santé opérateurs chantier	Gestion en fin de vie (avec les techniques industrielles existantes)
		Renouvelables	Disponibilité				
Résines	Polyester insaturés	Non	Limitée	Non	Elevé	Elevé : dégagement COV (styrène notamment)	non recyclable
	Epoxy (époxydes)	Non	Limitée	Non	Elevé	Elevé : Nocif par inhalation - Provoque des brûlures - Irritant pour les yeux et la peau	non recyclable
	Vinylesters	Non	Limitée	Non	Elevé	Elevé	non recyclable
	Ecopoxy (recherche en cours)	Oui	Elevée	Non	Moyen	Faible voir Nul	si 100% biosourcées potentiellement biodégradable
Renforts	Fibres Verre	Non	Elevée	Non	Moyen	Elevé: manipulation fibres => irritations peau et voies respiratoires	non recyclable
	Fibres Carbone	Non	Limitée	Non	Très élevé	Elevé: manipulation fibres => irritations peau et voies respiratoires	non recyclable
	Fibres végétales	Oui	Elevée	Non	Moyen	Faible	potentiellement biodégradable
Matériaux d'âme	Nid d'abeille Nomex	Non	Limitée	Non		Faible	non recyclable
	Ames en mousses PVC	Non	Limitée	Non	Moyennement élevé	Faible	non recyclable
	Ames Balsa	Oui	Limitée	Non		Faible	si pas de traitement chimique potentiellement biodégradable

MISE EN ŒUVRE DES COMPOSITES EN CONSTRUCTION NAVALE

Opérations principales

D'une manière générale, la mise en œuvre des composites en construction navale, nécessite cinq grandes opérations principales.

Fabrication des moules

Les moules femelles sont les plus utilisés. Néanmoins pour certaines applications, comme le moulage RTM, un contre moule est nécessaire.

Ces moules sont en général constitués de composites comparables à la fabrication envisagée (verre/polyester, ou verre/époxy, carbone/époxy) et structurés par des renforts en bois et/ou acier.

Préparation des demi-produits

Découpe puis étuvage des renforts et des âmes.
Mélange des résines avec leurs catalyseurs et durcisseurs.

Mise en œuvre des composites suivant le procédé choisi

La réalisation des pièces se fait en général en plusieurs étapes (plusieurs cuissons) permettant de contrôler à chaque étape l'état de la structure.

L'assemblage des pièces est ensuite réalisé en voie humide. La technique consiste en une préparation des surfaces, c'est à dire un ponçage et un dégraissage de la surface à coller. Les pièces sont ensuite assemblées à l'aide d'une colle de type époxyde et re-stratifiées afin d'assurer un transfert des efforts entre les divers éléments de la structure.

Traitements thermiques des composites (le cas échéant)

Pour les composites polyesters et vynilesters :

Le durcissement de la résine se fait à température ambiante.

Après démoulage, on laisse en général la réticulation se poursuivre, également à température ambiante. Une post-cuisson peut être effectuée pour accélérer et rendre plus complète la réticulation. Les performances finales (mécaniques notamment) sont ainsi optimisées.

Pour finir la réaction et obtenir une réticulation optimale, il est nécessaire d'effectuer une post-cuisson. Cependant, en construction navale, les pièces ne sont généralement pas post-cuites pour des raisons de productivité et de coût. Les composites sont donc sous-réticulés.

Pour les composites époxy :

Le durcissement de la résine se fait en général à température ambiante.

Une post-cuisson est ensuite effectuée en étuve, généralement entre 40°C et 120°C.

Le temps de post-cuisson est inversement proportionnel à la température.

Pour les prepregs époxy :

La polymérisation est obtenue par cuisson du matériau. Il n'y a donc pas de post traitement thermique à proprement parler.

Détourage / Meulage / Ponçage / Application traitement de finition

Pour terminer la pièce, il est nécessaire de réaliser les opérations suivantes : détourage, meulage, ponçage et application d'un traitement de finition.

Les procédés de mise en œuvre des composites sont les suivants

Procédés « moule ouvert »

Généralités

Les matériaux (fibres et renforts), sont déposés dans un moule simple (en général femelle) puis un compactage manuel est réalisé suivi d'un ébullage lui aussi manuel.
Le durcissement du composite est effectué sans pression.

Moulage au contact

Les renforts « secs » sont déposés sur le moule et sont imprégnés manuellement de résine liquide, accélérée et catalysée.

Moulage par projection simultanée

Des fils de renforts coupés et de la résine liquide préaccélérée et catalysée en continu, sont projetés sur la surface du moule.

Avantages / inconvénients

Les avantages de la stratification en moule ouvert sont :

- Procédé adapté pour les petites séries : de 1 à 1000 pièces / an
- Coût de fabrication peu élevé
- Outillage et mode de fabrication relativement simple

Les inconvénients de la stratification en moule ouvert sont :

- Nécessité de finition (détourage, perçage, etc.)
- Qualité tributaire de la main d'œuvre
- Faible cadence de production par moule (meilleure avec la projection)
- Espace de travail important
- Conditions de travail médiocres à très médiocres si absence d'agencements nécessaires
- Dégagement important de COV (styrène contenu dans les polyesters et vynilester notamment)

STRATIFICATION AU CONTACT		
Aspects environnementaux	Faisabilité technico-économique	Acceptabilité sociale
 Dégagement de COV	 Technique bien maîtrisée	 Une grande majorité des bateaux sont réalisés avec cette technique
 Technique dangereuse et peu valorisante pour l'utilisateur	 Outillage et mode de fabrication relativement simple	 Cette technique reste encore très présente pour les liaisons de pièces ou de cloisonnement.
	 Coût de fabrication peu élevé	

Généralités

Les matériaux (fibres et renforts), sont déposés entre un moule (femelle ou mâle) et un contre-moule rigide, semi-rigide ou souple, suivant la technologie de mise en œuvre. La pression exercée sur le moule par le contre-moule permet de répartir la résine et d'imprégner le renfort. Elle est maintenue jusqu'à durcissement du composite.

Infusion de résine sous membrane souple



Exemple d'infusion ; © Idbmarine

Développée à l'origine pour la mise en œuvre des bateaux monotypes de compétition, l'infusion est aujourd'hui pratiquée dans de plus en plus de chantiers. Cette technique permet d'aspirer sous vide la résine, dans un moule fermé par une bâche. Elle garantit une excellente imprégnation des fibres, la constance des caractéristiques mécaniques, le contrôle du poids ainsi que la reproduction parfaite, indispensable aux monotypes.

Les différentes étapes de l'infusion sont les suivantes

- Dépôt des renforts 'secs' (et âmes si sandwichs) dans le moule.
- Pose de tissus/feutres drainants et de textiles séparateurs.
- Réalisation d'un contre-moule par un système étanche à l'air, à l'aide d'une bâche à vide, solidarisée au moule par un mastic qui assure l'étanchéité entre les deux éléments.
- Mise sous pression de vide par aspiration d'air entre le moule et le film.

La résine liquide, accélérée et catalysée, est contenue dans un récipient annexe relié au système par des tuyaux. La dépression réalisée sur le système permet d'aspirer la résine qui migre au travers de renforts et les imprègne.

Depuis quelques années, les procédés de mise en œuvre par infusion se sont largement développés, en construction navale. Il existe diverses variantes: SCRIMP (Seemann Composites Resin Infusion Molding Process), VARI (Vacuum Assisted Resin Infusion), VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding) KIS (Kaisen Infusion System).

Avantages / inconvénients

Les avantages de l'infusion sont les suivants

- Meilleure maîtrise du process
- Obtention de stratifiés performants et légers.

Enfin, un des principaux avantages est l'aspect hygiène et sécurité au sein des ateliers. La pose des tissus se fait à sec et les opérateurs ont des contacts limités avec la résine et le système catalytique. Cela conduit à une réduction importante des émissions de COV au sein des ateliers. Ces atouts majeurs contribuent au développement des procédés en moules fermés en construction navale et rentrent parfaitement dans le cadre fixé par les récentes normes environnementales sur la limitation des émissions de COV.

Les inconvénients de l'infusion sont :

- Création d'un important volume de déchets (couches drainantes, bâche à vide et résine) contenue dans les plis de la bâche.
- Coût plus élevé que la stratification au contact

INJECTION EN MOULE FERME : INFUSION		
Aspects environnementaux	Faisabilité technico-économique	Acceptabilité sociale
<p>😊 Réduction importante des émissions de COV par rapport à la stratification au contact</p> <p>😞 Création d'un important volume de déchets (couches drainantes, bâche à vide et résine contenue dans les plis de la bâche.</p>	<p>😊 Retour d'expérience positif</p> <p>😊 Obtention de stratifiés performants et légers.</p> <p>😞 Coût plus élevé que la stratification au contact</p>	<p>😊 De plus en plus de chantier l'utilisent.</p>

RTM (Resin Transfer Moulding) - Moulage par injection basse pression de résine

Cette technique consiste à injecter sous pression la résine dans un moule fermé contenant des renforts secs de fibres. Ce procédé permet un aspect lisse des deux côtés de la pièce et permet une cadence élevée de fabrication. Les deux moules sont très structurés et donc chers, ce qui rend le procédé RTM surtout rentable pour de petites pièces⁸.

Ce procédé est encore peu répandu en construction nautique du fait du coût important des outillages nécessaires.

Les étapes de fabrication:

Le moulage s'effectue entre moule et contre-moule rigides.

Le renfort (mats, préforme, éventuellement tissus) est disposé dans l'entrefer du moule. Une fois celui-ci solidement fermé, la résine, accélérée et catalysée, est injectée sous faible pression (1.5 à 4 bars) à travers le renfort jusqu'au remplissage complet de l'empreinte.

Après durcissement de la résine, le moule est ouvert et la pièce démoulée.

⁸ European Confederation of Nautical Industrie, l'impact environnemental du nautisme, une approche du cycle de vie pour une plaisance bleue, juin 2009

Avantages / inconvénients :

Les avantages du process RTM sont :

- une meilleure maîtrise des process (répétabilité)
- de meilleures performances des composites (homogénéité, taux de fibres plus élevés),
- une meilleure qualité en termes d'état de surface (deux faces lisses) et de précision dimensionnelle (épaisseurs constantes).
- le respect de la santé des opérateurs
- l'absence de consommables donc pas de déchets polymérisés combustibles en fin de vie
- l'aspect compétitif de cette solution d'un point de vue coût et main d'œuvre pour les grandes série

L'inconvénient principal est l'investissement important car le coût de fabrication du moule est élevé.

INJECTION EN MOULE FERME : TYPE RTM		
Aspects environnementaux	Faisabilité technico-économique	Acceptabilité sociale
<p>😊 Réduction importante des émissions de COV par rapport à la stratification au contact</p> <p>😊 Pas de consommables donc pas de déchets polymérisés combustibles en fin de vie</p>	<p>😊 Solution compétitive, pour les grandes séries, d'un point de vue coût et main d'œuvre</p> <p>😊 Fiabilité de construction avec un taux résiduel de bulles proche de 0%</p> <p>😐 Intéressant pour les bateaux en série mais pas pour les productions uniques</p> <p>😞 Investissement important car coût de fabrication du moule élevé</p>	<p>😊 Cette technique fait son apparition dans de plus en plus de chantiers. Ces derniers se servent des qualités environnementales de cette technique pour améliorer l'image de leurs produits.</p>

Piste de recherches

RTM éco⁹

Parmi les nouveaux procédés de stratification en moule fermé, le système RTM Eco, ou RTM light, développé par Jean Paul GALICHET de l'AFPA de Laval, est en train de faire une percée dans la fabrication des ponts des bateaux de plaisance.

Le RTM éco utilise deux moules légers et combine à la fois l'injection à basse pression et le vide.

Ce procédé permet en effet de fabriquer en une seule injection un pont et son contre moule de manière très compétitive par rapport à une stratification au contact ou projetée traditionnelle, tant du point de vue du prix de revient et du temps de main d'œuvre que du devis de poids.

Cette technique est particulièrement adaptée à la production de petites et moyennes séries

Celle-ci est utilisée par de nombreux constructeurs dont le chantier Fontaine-Pajot pour ses catamarans¹⁰ ou le chantier la Gazelle des Sables¹¹.

⁹ Fédération des Industries Nautiques - Journée d'information sur le procédé RTM-ECO le 21 février 2008 à l'AFPA de Laval

¹⁰ Chantier Fontaine-Pajot, http://www.fontaine-pajot.com/les_atouts_voile.php

¹¹ Chantier la Gazelle des Sables, <http://www.lagazelledesables.fr/index.php?2008/02/27/33-corporate>

Moulage sous vide sous membrane souple

Procédé, à mi-chemin entre stratification voie humide et l'infusion sous bâche à vide, qui permet d'optimiser le compactage pendant le durcissement du composite, et donc le taux de renfort du composite final.

Procédés 'préimprégnés'

Généralités

Les «préimprégnés» ou «prepregs» sont des demi-produits, de faible épaisseur, constitués de fibres imprégnées de résine, prêts à l'emploi pour l'utilisation en fabrication. La résine est dans un état de pré polymérisation : la réticulation est obtenue uniquement par la cuisson, sans qu'il y ait besoin d'ajouter de durcisseur, d'accélérateur, de solvant etc.

D'une manière générale, les « prepregs » qui sont destinés à la réalisation de structures composites hautes performances contiennent au moins 60% de fibres en volume.

Avantages / inconvénients

Les « préimprégnés » permettent l'optimisation des composites au niveau de leur qualité, de leur propriétés mécaniques par rapport au poids, etc.

Ces produits se conservent à basse température (-18°C) générant un stockage en chambre froide impératif et une mise en œuvre à l'aide d'une étuve régulée.

Certains préimprégnés sont constitués en partie de fibres naturelles. Un préimprégné composite mis au point par la société Lineo, primé dans le cadre des JEC Innovation Awards 2010, combine les propriétés d'amortissement du lin et les performances de la fibre de carbone. Cette technologie actuellement utilisée pour les articles de sport comme les raquettes de tennis pourrait à terme être utilisée en construction navale.

Mise en œuvre

Pour la mise en œuvre, les renforts préimprégnés sont d'abord déposés dans le moule.

Comme dans le procédé d'infusion, nous réalisons ensuite, un système étanche à l'air à l'aide d'une bâche à vide, solidarisée au moule par un mastic.

L'ensemble ainsi constitué est ensuite mis en étuve ou en autoclave pour y subir un cycle de polymérisation variable selon les systèmes de résine utilisés. Cela commence généralement par une mise sous vide réalisée par dépression grâce à une pompe à vide (cas des cuissons en étuve), ou par une mise sous pression dans l'autoclave, accompagnée d'une montée en température pouvant aller jusqu'à 180°C et plus.

La pression est maintenue jusqu'au durcissement du composite

Cas particulier des constructions en thermoplastiques (renforcés ou non)

Généralités

Une matière thermoplastique désigne une matière qui se ramollit d'une façon répétée lorsqu'elle est chauffée au dessus d'une certaine température, mais qui, au-dessous redevient dure.

À l'inverse des thermodurcissables, les thermoplastiques sont composés d'une matière remaniable, qui peut être mise en œuvre de façon illimitée.

Cependant, les thermoplastiques présentent des propriétés mécaniques plus faibles que la plupart des autres composites utilisés en construction navale.

Domaines d'application des thermoplastiques en construction navale

Jusqu'à récemment, l'usage des thermoplastiques en construction navale était limité à la fabrication de petites embarcations où la recherche de hautes performances n'était pas une priorité par rapport aux contraintes de coûts : kayaks, flotteurs d'engins de voile légère, annexes, etc.

Les thermoplastiques sont également présents sur un navire, car ils sont couramment utilisés pour la fabrication d'équipements et d'accastillage.

Les principaux thermoplastiques utilisés dans ces applications sont le polyéthylène et le polypropylène. Ils sont généralement mis en œuvre par rotomoulage ou thermoformage.

Exemple :

- kayaks en polyéthylène rotomoulé (kayaks Rotomod) ou thermoformé (kayak BIC)
- bateau à moteur en polypropylène rotomoulé (Walhy 435)

L'apparition de nouveaux matériaux plus performants, mêlant matrices thermoplastiques et renforts de fibres longues, pourrait cependant ouvrir de nouveaux horizons vers des applications plus structurelles. Parmi ces matériaux, on peut notamment citer :

- **Le Twintex¹²**

C'est un tissu co-mêlé de fibres de verre et de fibres de polypropylène.

- **La technologie TP-Seal®**

Ce produit développé par Total Petrochemicals en collaboration avec Sealver & Dynamic Rotomolding est composé entièrement à base de résines polyéthylène rotomoulées.

Il est produit par un procédé de rotomoulage multicouches, rapide et économiquement compétitif par rapport aux techniques de fabrication existantes.

Avantages / Inconvénients des thermoplastiques en construction navale

Avantages : prix, obtention de formes complexes, adaptés pour des séries moyennes à grandes, faible entretien.

Inconvénients : faibles caractéristiques mécaniques, faible tenue en température, taille des pièces limitée par le coût des outillages nécessaires (moules/presses), températures de mise en œuvre élevées.

La durabilité des thermoplastiques est encore mal connue aujourd'hui.

Avantages environnementaux des thermoplastiques

Le principal avantage des thermoplastiques est le fait qu'ils soient recyclables en fin de vie.

En effet, en fin de vie, les thermoplastiques peuvent être fondus puis réutilisés pour la fabrication de nouvelles pièces.

¹² Chantier 2win, inventeur du Twintex, <http://www.2-win.fr/twintex.php>

Synthèse matériaux composites

Matériaux

La plupart des matériaux mis en œuvre dans les constructions composites sont issus de la pétrochimie, ce qui induit des matières premières non renouvelables et procédés de fabrication impactants et grands consommateurs d'énergie.

Leur manipulation et leur mise en œuvre sont globalement impactantes sur la santé humaine

La part de matière recyclée utilisée est nulle

Procédé de mise en oeuvre

Globalement les procédés de construction en composites sont générateurs de grosses quantités de déchets non valorisables :

- chutes sèches et poussières de renforts lors de la découpe
- chutes et poussières de stratifiés lors des détourages et ponçages
- résine prise en masse avant d'avoir pu être utilisée lors de l'imprégnation, du fait de temps de gel courts
- résine perdue dans les procédés d'infusion (excédent de résine pour assurer une imprégnation complète des tissus, résine perdue dans les consommables d'infusion, etc.)
- grosse consommation d'emballages (du fait notamment de la diversité et du nombre de matériaux et produits différents utilisés), dont la plupart finissent dans la benne à ordures

Il faut noter que les constructions composites imposent l'usage de moules : suivant la taille de la série de pièces à réaliser, le poids relatif des impacts environnementaux liés au moule peut ne pas être négligeable.

Les consommations sont essentiellement énergétiques. Elles peuvent être non négligeables suivant les procédés : par exemple les procédés prépregs nécessitent l'usage de chambres froides pour le stockage, et d'étuves, voire d'autoclaves, permettant d'imposer des températures élevées.

Utilisation / usage

Les bonnes caractéristiques mécaniques des composites permettent d'optimiser les structures et de réaliser des bateaux légers, donc potentiellement moins consommateurs de carburant. Les matériaux composites présentent un faible entretien et une bonne durabilité (environ 30 à 50 ans pour un bateau) et ne nécessitent qu'un faible entretien durant leur phase d'usage.

Fin de vie et recyclage

C'est un gros point noir des constructions composites : désassemblage des constituants d'une construction composite difficile, recyclabilité des matériaux faible à nulle.



Bois



© Jezequel

Le bois, produit aux multiples qualités reconnues, est ou a été, dans la majorité des pays du monde, le matériau le plus utilisé pour la construction navale des petites et moyennes unités.

Le principal avantage du bois est qu'il est un matériau renouvelable. Il est cependant nécessaire de s'assurer que l'exploitation des forêts se fasse de manière durable. Pour cela les professionnels devraient s'attacher à utiliser du bois certifié. Il existe actuellement deux labels pour certifier qu'un bois est issu d'une forêt gérée durablement le label FSC (Forest Stewardship Council) ou PEFC (Pan-European Forest Certification).

Il est important de signaler que le bois utilisé dans la construction navale est souvent importé, d'Afrique, d'Asie du Sud-est et d'Amérique. Son transport entraîne ainsi des fortes émissions de CO₂ qui représentent un impact important sur l'environnement. Lorsque cela est possible, l'utilisation de bois de forêt locale est préférable

Mais l'adéquation indispensable de la production forestière (en quantité et qualité) avec les besoins des chantiers n'est pas acquise.

Les produits courants d'entretien, les colles... ont un impact négatif sur l'environnement, et les mises en état sont coûteuses en main d'œuvre.

Il existe différents types de construction bois :

- la construction traditionnelle avec utilisation de bois massif (exemple : bordage classique ou à clin)
- les méthodes modernes : bois tranché, déroulé ou contreplaqué avec collage et revêtements synthétique

Principaux produits bois utilisés

Les principales essences de bois, leur provenance, leurs propriétés mécaniques ainsi que leur application marine sont répertoriées dans le tableau suivant¹³.

Principales essences de bois utilisées en construction navale

	Provenance	Propriétés mécaniques	Application marine
Western red cedar ou canoë cedar (Thuya plicata)	Importé de la côte occidentale des Etats-Unis et du Canada. Quelques reboisements en France et Belgique.	Faibles résistances mécaniques. Fissile et cassant aux chocs.	Le plus utilisé de tous les cèdres. Lisses jointives. Bois moulé avec des plis sciés supérieurs à 6 mm d'épaisseur.
Acajou ou acajou de Bassam, N'Gollon, African mahogany (Khaya ivorensis)	Côte d'Ivoire, Cameroun, Gabon, Ghana, Nigéria	Résistances mécaniques moyennes. Elastique, résistant aux chocs.	Tranché pour les bordés en bois moulé.
Okoumé ou Gaboon (UK) (Aucoumea klaineana)	Gabon, Congo (Brazzaville), Guinée équatoriale	Assez faibles résistances mécaniques.	En déroulé, c'est le plus utilisé en contre-plaqué.
Chêne	Toute l'Europe	Excellente résistance mécanique en compression comme en flexion.	Construction traditionnelle. Quilles, membrures et pièces de charpente.
Teck	Thaïlande Birmanie Indonésie Vietnam Guyane	Résistance mécanique et aux chocs plutôt moyenne. Elastique, imputrescible.	Ponts, caillebotis.

Certaines essences européennes, telles que le chêne, le frêne, le robinier, le mélèze, le douglas sont, à condition de les traiter correctement, tout à fait adaptées à la construction navale. Qui plus est, ces essences sont souvent d'un coût plus raisonnable que les essences importées.

¹³ Site internet Mandragore2 : <http://www.mandragore2.net/>

La construction traditionnelle

Il existe deux techniques de construction classique:

La première dite « traditionnelle »

La construction dite « traditionnelle » commence par la conception de la quille qui recevra les varangues et un lest extérieur si besoin. Des membrures sciées (pièces de chêne réalisées en plusieurs parties), disposées à intervalles réguliers, s'ajouteront sur la quille et formeront le squelette du bateau.

La prochaine étape consistera à poser les bordés de l'étrave au tableau qui seront fixés aux membrures à l'aide de pointes ou de vis.

La seconde dite « construction légère »

Comme pour la première, elle débute par la fabrication de la quille et la pose de l'étrave, de l'étambot et de la voute sur une même base. Le tableau sera ensuite fixé sur le voute.

Contrairement à la construction précédente, l'étape suivante va consister à poser des gabarits ou couples provisoires de l'avant à l'arrière du bateau et à intervalles réguliers. Ils sont réglés perpendiculairement à la quille et maintenus à l'aide de lisses.

Viendra ensuite la pose des varangues, pièces constituant la partie inférieure de la coque et réalisées généralement en chêne. Puis, les bordés seront posés et fixés aux gabarits de manière provisoire.

La technique consistera à mettre en place des membrures dites « ployées » ou « bouillies », (pièces généralement en acacia qui une fois chauffées à la vapeur seront appliquées une à une contre le bordage intérieur et viendront prendre la forme exacte de la coque). Une fois ces membrures rivées les gabarits seront enlevés¹⁴.

L'ajustement des différentes pièces est très important afin d'assurer l'étanchéité du bateau mais également d'augmenter sa durée de vie. Le calfatage peut être ensuite réalisé avec un simple fil de coton ou du chanvre et du mastic époxy. Les finitions consistent ensuite en un ponçage très soigneux et à l'application de vernis ou de peinture.

Il existe également d'autres techniques traditionnelles de construction en bois comme la construction à clin, le bordé « norvégien » ou le bois latté, le bordé sur lisse ou encore le double bordé.

La construction bois utilise une main d'œuvre qualifiée, des techniques d'assemblage haute qualité, ainsi qu'une protection des surfaces efficaces avec peinture et substances généralement synthétiques.

Pour les grands navires marchands, la construction bois a été progressivement abandonnée au profit principalement de l'acier. Jusqu'aux années 1960 le bois était le matériau majoritairement utilisé en pêche ou en plaisance. Aujourd'hui la construction en bois traditionnelle a pratiquement disparu au profit de matériaux (composites, aluminium, acier) ou de procédés de mise en œuvre (construction bois moderne), plus accessibles d'un point de vue technique ou économique.

Cependant quelques chantiers navals, continuent à perpétuer la construction traditionnelle pour la plus grande satisfaction de certains acquéreurs et d'utilisateurs de la mer.



© Jezequel

¹⁴ Chantier de construction naval Jezequel : <http://chantier-jezequel.com/index.htm>

BOIS : CONSTRUCTION TRADITIONNELLE		
Aspects environnementaux	Faisabilité technico-économique	Acceptabilité sociale
<p>😊 Valorisable en fin de vie sous conditions. Le recyclage peut être difficile en fonction des revêtements appliqués.</p> <p>😊 Matériaux renouvelables si gestion durable des forêts</p> <p>😊 Attention à l'énergie générée par le transport et aux dégagements de CO₂</p> <p>😊 Coût écologique de maintenance et d'entretien élevé</p>	<p>😊 Demande une main d'œuvre qualifiée</p> <p>😊 Ne peut pas être réalisée en série</p> <p>😊 Nécessite un entretien soigné et régulier</p>	<p>😊 Beaucoup d'adepte de la construction bois</p> <p>😊 De moins en moins de chantiers y ont recours</p>

Construction moderne

La construction « moderne » est la construction bois la plus courante aujourd'hui.

Ce type de construction assemble le bois massif ou contreplaqué avec des colles performantes, majoritairement des résines époxy.

Le principe des constructions bois époxy consiste à traiter à la résine époxy toute pièce de bois rapportée dans la construction du bateau. L'hygrométrie est ainsi stabilisée et le bois ne vieillit donc plus.

A l'intérieur cela le protège totalement de l'eau et des hydrocarbures sous le moteur. A l'extérieur, le même traitement ou la pose d'un tissu de verre rend totalement étanche les fonds comme le pont.

La résine sert aux collages, à la stratification, aux enduits et au montage de l'accastillage, assurant encore une meilleure solidité et étanchéité.

Le principe s'applique donc aux constructions neuves comme aux restaurations.

Domaines d'application en construction navale

Le bois / époxy est adapté à la fabrication de tout type de navire de plaisance monocoque ou multicoque, voile ou moteur, de la barque à des unités de plusieurs dizaines de mètres (des monocoques ou multicoques de 60 pieds ont déjà été construits sur ce principe), de grand voyage ou de compétition (exemples : monocoques de course au large série 40').

Le bois / époxy est particulièrement adapté aux fabrications à l'unité. Mais certains chantiers de petites à moyennes séries l'ont également adopté (ex : Fora Marine et ses RM Yachts).

La construction de bateaux en bois / époxy se fait en trois grandes étapes :

- Mise en œuvre des bois
- Stratification
- Traitement de finition des coques

Méthodes de mise en œuvre des bois

Les techniques de mises en œuvre citées ci-dessous sont les plus courantes. Cependant il en existe de nombreuses variantes. Certaines d'entre elles peuvent, également, être combinées sur un même bateau.

Contre plaqué

Les qualités mécaniques (rigidité, légèreté, solidité), les qualités de confort (ambiance intérieure, isolation thermique et phonique) et l'esthétisme (coques laquées) attirent les clients.

De nos jours, cette méthode est sûrement une bonne alternative, d'un point de vue technique et économique, pour les constructions à l'unité. Cependant son impact sur l'environnement est non négligeable.

Le contreplaqué est plus léger mais nécessite beaucoup de résine, colles, peintures et revêtements. Ce qui rend leur recyclage impossible contrairement au bois traditionnel. Les bateaux en contreplaqué ont un coût environnemental relativement élevé en fin de vie¹⁵.

Pour des unités de plaisance, les panneaux de CP ont généralement une épaisseur > 15 mm.

Les principales opérations sont manuelles ou réalisées avec de l'outillage portatif courant :

- 1 - réalisation d'un marbre ou châssis
- 2 - mise en place des gabarits, des cloisons, étrave et tableau arrière
- 3 - pose des bordés
- 4 - stratification des bouchains : tissu de verre + époxy
- 5 - enduit de finition, traitement sous couche peinture et peinture

Strip planking (ou lisses non jointives)

La construction « strip plank » se traduit par « lattes-jointives ». Elle est apparue dans les années 1970 avec la popularisation des colles époxy. Elle permet de belles formes rondes et offre de bonnes propriétés mécaniques, rigidité et gain de poids. Il s'agit vraiment d'un compromis entre la construction composite et la construction bois, puisque les lattes sont utilisées comme une âme active avec une peau en verre-époxy de chaque côté¹⁶.

Cette technique utilise des couples de la coque bateau comme structure. Sur l'extérieur de ces couples, on vient déposer des lisses relativement épaisses d'un bois de faible densité.

Les lisses prennent ainsi la forme de la coque. Une fois les couples retirés, une stratification époxy / tissus de verre est ensuite réalisée des deux côtés de la coque formée par les lisses.

Le bois le plus utilisé pour la réalisation des lattes est le Red cédar, pour son faible poids spécifique et pour son prix très raisonnable, mais n'importe quel bois de faible densité est susceptible d'être employé.

Les couples sont généralement en aggloméré ou en contre plaqué.

Le strip planking est une méthode de construction, bien adaptée à la construction à l'unité, pour des coques en forme.

Bois moulé sur lisses

La technique de bois moulé, a vu le jour après la deuxième guerre mondiale. Cette méthode permet de construire à l'unité un bateau léger, voire ultra léger, solide et étanche par tous les temps.

Construire en bois moulé revient à fabriquer un panneau de contre-plaqué à la forme d'un bateau.

Cette technique utilise aussi des couples et des cloisons permanentes du bateau, qui alignés sur un chantier forment un mannequin temporaire. Sur ce mannequin, plusieurs plis de 3 à 4 mm d'épaisseur, de bois tranché ou de contreplaqué fin sont déposés.

¹⁵ European Confederation of Nautical Industrie, l'impact environnemental du nautisme, une approche du cycle de vie pour une plaisance bleue, juin 2009

¹⁶ Bulletin technique sur la construction navale, le bois Epoxy

Des agrafes sont utilisées pour tenir les plis en place pendant le collage, technique parfois remplacée par un sac à vide.

La structure réalisée est ensuite protégée soit par un vernis appliqué directement soit par une peau extérieure en verre-époxy

Le bois moulé sur lisses est une technique adaptée à n'importe quel type de bateau à l'unité, pour des coques en forme. Simple dans sa réalisation, il offre un bon compromis entre poids et rigidité. Néanmoins c'est une technique qui nécessite un temps de main d'œuvre important.

Stratification

Les produits de collage et de stratification sont principalement du tissu de verre et résines / colles époxy. La stratification se fait au contact de manière « classique » avec éventuellement compactage sous vide sous membrane souple.

Les renforts « secs » sont déposés directement sur les surfaces bois puis imprégnés manuellement. Les deux surfaces extérieures et intérieures sont stratifiées successivement.

Traitement Finition des coques

Après dépôt d'un enduit pour corriger les éventuels défauts de surface et ponçage final de la coque, le système de finition peinture est similaire à celui d'une construction composites.

Bilan technico-économique des techniques modernes de construction bois

Les bateaux en bois-époxy sont plus légers et plus durables que les bateaux construits en polyester.

Les constructions bois époxy permettent d'obtenir des coques structurées très rigides.

Les coûts matériels sont modérés excepté ceux de certains bois durs.

Les coûts de main d'œuvre sont nettement plus importants qu'en construction composite, sauf dans le cas d'une construction à l'unité.

Il est important de préciser que ces dernières années, les techniques modernes de construction bois ont bénéficié de beaucoup moins d'effort de Recherche&Développement que les constructions composites et d'indiquer que des gains de productivité importants sont possibles.



Le Pen-Hir chantier Icarai ; ©Icarai

Bilan environnemental des techniques modernes de construction bois

Matériaux

Le bois est un matériau renouvelable à condition que les forêts soient gérées durablement.

Cependant en construction moderne, les colles utilisées sont issues de l'industrie pétrolière et sont donc des ressources non renouvelables.

Les résines et les fibres posent les mêmes problèmes que pour les matériaux composites mais en quantités plus faibles.

Le coût énergétique de la fabrication des matières premières est faible comparé à l'aluminium ou l'acier mais attention au transport du bois qui peut générer un impact important

Construction

Du point de vue de la construction, les méthodes bois / époxy ne nécessitent pas la fabrication / l'usage de moules rigides ou semi rigides. C'est un avantage par rapport aux fabrications composites.

Nous retrouvons par contre les mêmes problèmes dus à la mise en œuvre des composites : santé humaine, déchets composites non valorisables, quantités importantes d'emballage et consommables (notamment si la stratification est faite sous bâche).

Les consommations énergétiques sont faibles (outillages portatifs courants).

Utilisation / usage

Les constructions bois / époxy permettent d'obtenir des coques et structures très rigides et légères, et donc de réaliser des bateaux potentiellement moins consommateurs de carburant en phase d'usage. La durabilité du bateau est bonne et l'entretien faible contrairement à la construction « bois » traditionnelle.

Fin de vie et recyclage

La fin de vie des bateaux pose des problèmes comparables aux constructions composites : désassemblage des constituants difficile, recyclabilité des matériaux faible à nulle.

BOIS : CONSTRUCTION MODERNE		
Aspects environnementaux	Faisabilité technico-économique	Acceptabilité sociale
<p>😊 Léger, bonne qualité mécanique</p> <p>☹️ Gestion difficile en fin de vie. Le bois issu de la construction moderne est classé en tant que déchets spéciaux en raison de la part élevée de colles, d'imprégnations et de peintures de protection</p>	<p>😊 Technique de collage haute qualité, aujourd'hui bien maîtrisée</p> <p>😊 Coût de revient plus faible que la construction traditionnelle</p>	<p>😊 La construction moderne est la construction bois la plus courante aujourd'hui</p>

Projets de recherche allant dans le sens d'une navigation durable

Contreplaqué bouleau et peuplier

Aujourd'hui pour diminuer l'impact environnemental du contre plaqué, des recherches sont en cours pour utiliser des bois locaux, comme le bouleau ou le peuplier, pour ce type de construction.

Le principal avantage est la réduction de la distance de transport et donc un gain d'émission de CO₂ significatif. Les techniques de fabrication de contreplaqué avec des bois locaux existent et sont bien maîtrisées mais leur application en construction navale et leur tenue en milieu maritime est mal connue.

Le chantier Icarai innove en expérimentant l'utilisation du contreplaqué de bouleau sur le Pen-Hir, lancé l'été dernier. L'essai grandeur nature s'avère concluant mais des essais ont également été lancés en laboratoire en début d'année pour comparer les caractéristiques et la résistance au vieillissement de plusieurs types de CP. L'écobilan du contreplaqué de bouleau est meilleur que celui des CP habituellement utilisés sur les bateaux. La société Philonautic travaille également autour de cette thématique.

Bois traités à haute température : exemple du BMT

Le bois traité à haute température est chauffé entre 160 et 245 °C (320 et 473 °F), sous une atmosphère contrôlée, pauvre en oxygène (azote, vapeur d'eau et gaz de combustion) ou bien immergé dans de l'huile végétale chauffée. La pyrolyse contrôlée qui résulte de ce traitement modifie les composants qui sont les plus hydrophiles dans le bois et en diminue l'humidité d'équilibre¹⁷.

Le bois, qui naturellement est hydrophile, **devient hydrophobe**. Selon les paramètres du procédé et l'essence traitée, on obtient un **matériau**, de couleur **plus foncée et attrayante**, dont la résistance à la dégradation fongique et la stabilité dimensionnelle sont sensiblement améliorées par rapport à l'essence d'origine; mais cela, assez souvent au détriment de certaines de ses propriétés mécaniques, notamment sa résilience.



Le procédé BMT consiste à chauffer du bois à haute température dans un four de chauffe dédié à cette opération. Le traitement modifie les qualités physiques, mécaniques, biologiques et esthétiques du bois ainsi traité et commercialisé sous la marque BMT®. Le matériau utilisé doit être de grande qualité et préalablement séché. Selon les promoteurs, deux éléments distinctifs caractérisent plus particulièrement ce procédé des autres qui utilisent un four. D'une part, la source de chaleur est complètement séparée du four, réduisant de façon importante les points chauds critiques dans la charge. D'autre part, les contrôles de procédé régulent la température et le taux d'hydrométrie du vecteur thermique contenu dans l'enceinte de traitement et font varier sa température selon six phases successives. La montée en température se fait jusqu'à de 200 degrés dans une atmosphère sèche.

Les essences les plus étudiées sont l'épicéa, le peuplier, les pins, le sapin, le douglas, l'hêtre, le chêne, le bouleau. Le traitement d'autres espèces peut vraisemblablement être envisagé cependant, le cas échéant, il sera nécessaire de vérifier leur aptitude au traitement et d'adapter les paramètres du procédé¹⁸.

D'un point de vue environnemental ce processus permet d'utiliser des bois locaux donc moins de transport, d'obtenir un bilan énergétique relativement faible et de recycler aisément le produit en fin de vie.

D'un point de vue faisabilité technico-économique, la technique est bien maîtrisée à un coût concurrentiel.

Du fait de faibles contraintes à la rupture, les applications du BMT sont limitées. Aujourd'hui le BMT a fait ses preuves en éco-habitat où il est utilisé dans les applications détenues par les bois exotiques : les bardages, le mobilier urbain et de jardin, les menuiseries extérieures, les murs acoustiques, les planchers, etc.

Nous attendons des retours d'expérience d'application en construction navale. Il serait envisageable d'utiliser, par exemple, le BMT pour les aménagements intérieurs et peut être pour recouvrir le pont des bateaux.

Parmi les autres procédés permettant de traiter le bois à hautes températures, il existe les procédés Mekitek®, ThermoWood®, Perdure®, STABILPROCESS®, le procédé de réification®, etc.

¹⁷ Bois BMT : <http://www.bois-modifie-thermiquement.com>

¹⁸ Dumoulin Bois, <http://www.dumoulin-bois.fr>

Aluminium



© Normandy Yachts

Depuis le début des années 1960, la production mondiale d'aluminium augmente d'un million de tonnes tous les vingt mois, ce qui confirme l'intégration de ce métal blanc dans nos habitudes de vie.

Cette croissance s'accompagne d'une meilleure prise en compte du cycle de vie de l'aluminium qui lui permet d'avoir, contrairement à la plupart des matériaux, une valeur marchande élevée en fin de vie grâce à son fort potentiel de recyclabilité.

Fabrication

L'aluminium est un élément abondant dans la croûte terrestre (8% de la masse, soit le troisième élément le plus abondant après l'oxygène et le silicium).

Mais il se trouve rarement sous sa forme pure et il est très difficile à extraire des roches qui le contiennent.

Le principal minerai d'aluminium est la bauxite.

Aujourd'hui, la bauxite est principalement extraite dans les Caraïbes, en Australie et en Afrique.

La transformation de la bauxite en aluminium consomme beaucoup d'énergie électrique. La production d'une tonne d'aluminium requiert 4 à 5 tonnes de bauxite ainsi que de grandes quantités d'eau et de cryolite, le minerai servant de solvant. La transformation par électrolyse consomme entre 13000 et 17000kWh d'énergie, ce qui génère du dioxyde de carbone (CO₂). Néanmoins, une fois produit, ce métal est facilement recyclable et son recyclage ne nécessite que 5% de l'énergie nécessaire à sa production.

La coque en aluminium d'un bateau de plaisance peut être très largement recyclée et réutilisée comme matière première (jusqu'à 95%).¹⁹

Les grades utilisés en construction nautique sont des alliages contenant principalement de faibles pourcentages des éléments suivants : manganèse, Cr, Ti, Zn, Fe, Si, Cu

Les séries 5000 contiennent 3 à 5% massique en magnésium et 0,1 à 1 % des autres éléments. Les séries 6000 contiennent moins de 5% massique au magnésium (<5% massique) et du silicium.

Il existe 3 grands types de construction aluminium en construction navale :

- construction « tôles soudées »
- construction « tôles sur membrures et lisses »
- l'aluminium épais - Strongall®

¹⁹ European Confederation of Nautical Industrie, l'impact environnemental du nautisme, une approche du cycle de vie pour une plaisance bleue, juin 2009

Construction « tôles soudées »

La construction « tôles soudées » est utilisée pour la construction de barges, navires professionnels, petite plaisance (barques, pêches-promenade, etc.).

Cette construction est généralement utilisée sur des unités à coques développables (coques plates, à bouchains, etc.).

Les épaisseurs de tôles mesurent jusqu'à 10mm suivant le type, la taille du navire et la position des tôles (plus épais dans les fonds).

Exemples : Coqalu²⁰ : plaisance voile/moteur et professionnels

Construction « tôles sur membrures et lisses »

La construction « tôles sur membrures et lisses » est utilisée pour la plaisance voile et moteur, yachts, navires professionnels etc.

Cette construction est utilisée généralement sur des unités de plus de 10 mètres à coques en forme.

Elle génère cependant plusieurs inconvénients :

- Beaucoup de main d'œuvre, donc un coût de construction élevé.
- Soudures plus délicates sur les petits navires en raison de courbures plus accentuées.

Exemples : Chantier Alubat²¹ : voiliers grande croisière 10 à 20m

L'aluminium épais : Strongall®

Ce procédé innovant (breveté, marque déposée) mis au point par le chantier META fait appel à des tôles d'aluminium zingué anti-électrolyse de forte épaisseur, pour la construction de formes (coque et pont) autoporteuses et sans structure.

Les tôles, d'une seule longueur, sont précontraintes et assemblées entre elles assemblées entre elles par pointage puis soudage.

La tension initiale dans les peaux de bordé induite par la précontrainte, associée à la forte épaisseur, assure une solidité aux chocs très importante.

Les constructions en Strongall® possèdent une très bonne résistance à l'électrolyse grâce à son revêtement anti-électrolyse « Inversalu ».

Par rapport à une construction en alu fin et structuré « traditionnelle », les bordés aluminium sont 2,5 à 3 fois plus épais, et la prise de poids « relative » est en moyenne de l'ordre de + 20% d'aluminium ce qui représente moins de 5% sur le poids final..

Applications :

Ce procédé convient parfaitement pour une fabrication en série ou une fabrication à l'unité sur plan.

Il est particulièrement applicable aux navires professionnels de tailles réduites et moyenne (3 à 35 tonnes) dont l'usage est très rude. Ce procédé permet notamment d'obtenir un bateau plus résistant aux chocs (exemples : Objet Flottant Non Identifié (OFNI), glaces...)

Il est également très apprécié par les marins qui utilisent leurs bateaux comme domicile flottant et de plus économiquement très adapté aux tailles de navires évoluant entre 9 et 20m.

Exemples :

Meta²² : voiliers / trawlers / navires professionnels de grande robustesse (pour usages intensifs)

²⁰ Chantier Coqalu, <http://www.coqalu.com/>

²¹ Chantier Alubat, www.alubat.com/

²² Chantier Méta : www.meta-chantier-naval.fr

Avantages / Inconvénients techniques de l'Alu en construction navale

Avantages :

Légèreté, solidité, rigidité, résistance au poinçonnement, et durabilité exceptionnelle.

Bonne résistance à l'impact, bonne résistance en milieu salin, bonne durabilité si l'on sait contourner les problèmes de résistance à la corrosion et la fatigue.

Inconvénients :

Déformations à la soudure empêchant un travail parfait et rendant l'enduit très coûteux si on veut une belle finition.

Mauvaise tenue des ponts en teck, enduits et peinture (en plus de la nécessité de mettre beaucoup d'enduit).

Médiocre résistance à la corrosion électrolytique

Les constructions à peau externe mince sont réputées fragiles à cause de la faible résistance à la fatigue de l'aluminium, ce qui limite l'avantage de poids.

Sur les bateaux de croisière, la technique « Strongall » permet des constructions très simplifiées et d'une très grande solidité et rigidité et une forte résistance aux chocs.

Ce matériau est très sensible à la corrosion galvanique, sa protection doit être très soignée.

Bilan environnemental de l'utilisation de l'aluminium en construction navale

L'alliage d'aluminium mérite qu'on s'y intéresse dès la conception, car c'est une matière avec un important capital d'énergie emmagasinée pouvant être valorisée dans un nouveau cycle de vie. Ceci permet surtout à l'alliage léger de « rembourser » une lourde dette d'énergie et de CO₂ due à son extraction et à sa fabrication.

Matériau

Le point négatif est le coût énergétique de production du kg d'alliage d'aluminium (lingot) de première fusion. L'utilisation d'aluminium recyclé (dit de seconde fusion) peut permettre de réduire considérablement ce coût énergétique. Le recyclage de l'aluminium est beaucoup moins coûteux que l'extraction à partir du minerai de bauxite. Il nécessite 95 % d'énergie en moins et une tonne d'aluminium recyclé permet d'économiser quatre tonnes de bauxite. En sautant l'étape de l'électrolyse, qui réclame beaucoup d'énergie, on évite les rejets polluants qui lui sont associés.

En 2002, la production mondiale d'aluminium recyclé, était de 7,9 Mt sur un total de production d'aluminium de 33.8 Mt. C'est-à-dire que 23% de l'aluminium produit est issu du recyclage (2^{ème} fusion). Cependant, pour l'instant, peu de projet tablent sur l'utilisation d'aluminium recyclé.

Construction

La malléabilité et la légèreté de l'aluminium permettent une faible utilisation de l'énergie pendant la transformation des lingots en demi-produits et la mise en œuvre de ces demi-produits (usinage, chaudronnerie, etc.)

Utilisation / usage

Faible entretien nécessaire

Fin de vie et recyclage

La caractéristique la plus intéressante de l'aluminium demeure sans aucun doute son potentiel de recyclage. Pour recycler l'aluminium, on le fait simplement fondre.

Cependant, afin que cela soit possible, il est nécessaire que les composants soient facilement démontables et séparables. Les traitements de surface et peintures posent de gros problèmes, en particulier sur les coques en alliage en raison de la difficulté technique, donc du coût, à reconstituer des alliages de qualité à partir d'une matière recyclée polluée. Une coque en alliage d'aluminium devrait rester brute, à l'extérieur comme à l'intérieur.²³

L'aluminium est quasiment recyclable à l'infini sans perdre ses qualités, à condition de ne pas fondre dans un même bain des alliages de composition différente.

ALUMINIUM		
Aspects environnementaux	Faisabilité technico-économique	Acceptabilité sociale
<ul style="list-style-type: none"> ☺ Matériau en abondance ☺ Bon recyclage en fin de vie ☺ Faible entretien ☺ Très bonne durabilité si présence d'une protection anticorrosion ☹ En première fusion, très coûteuse en énergie et en eau ☺ Cout énergétique moindre en seconde fusion 	<ul style="list-style-type: none"> ☺ Technique maîtrisée ☺ Coût acceptable ☺ Bonne résistance aux chocs 	<ul style="list-style-type: none"> ☺ La construction en aluminium est adaptée à de nombreux programmes de navigation



EcoTroll, bateau de voyage construit en Strongall et équipé d'une propulsion hybride

²³ Peter Gallinelli, architecte naval, <http://www.sailworks.net>

Acier



©DR

Matières premières

L'acier est un produit manufacturé contenant du fer et du carbone (entre 0,02% et 1%). Différents éléments sont ajoutés au stade de l'affinage afin de conférer aux aciers leurs qualités.

Le fer est un matériau qui se trouve en abondance sur terre : c'est le quatrième élément le plus abondant dans la croûte terrestre (5% en masse). Il ne se trouve presque pas à l'état naturel pur (sauf à l'ouest du Groenland) mais en minerais, les principaux étant des oxydes (Fe_2O_3) ou des carbonates de fer. Leur teneur en fer varie de 30 à 70 %.

Les principaux gisements de fer se trouvent en Russie, au Brésil, et en Chine.

Les principaux producteurs d'acier sont : la Russie, le Japon, les Etats-Unis.

Aciers utilisés en construction nautique

Bien que certains alliages spécifiques sont utilisés, pour la fabrication de coques, on utilise couramment des grades d'acier de construction à usage général considérés comme aciers non alliés, contenant un faible pourcentage de carbone ainsi que du manganèse (< 2%) et d'autres éléments d'alliages en faible quantité (<1%).

Construction des demi-produits en acier

La construction acier est tout à fait comparable à la construction aluminium « tôles sur lisses » ou « tôles soudées à bouchains ».

Domaines d'application de l'acier en construction navale

L'acier est employé pour la construction d'unités de taille importante (au moins > 10 m).

La construction navale est principalement fondée sur l'acier : navires de commerce (transport de marchandises, tankers, porte-containers, etc.), navires professionnels divers (transport de passagers, navires de servitude, etc.), yachts...

Pour ce qui est de la construction nautique, dans les années 70, le voilier en acier représentait le bateau hauturier par excellence (ex célèbre : Joshua, le bateau de Moitessier), pas forcément rapide, mais résistant. Il est encore employé pour des bateaux de grand voyage, mais il a été progressivement supplanté par la construction en aluminium notamment. Il est aujourd'hui peu utilisé par les chantiers. Il reste apprécié pour la construction amateur (relativement accessible d'un point de vue technique et coût). En France, on considère que moins de 1% des bateaux de plaisance sont en acier²⁴.

²⁴ European Confederation of Nautical Industrie, l'impact environnemental du nautisme, une approche du cycle de vie pour une plaisance bleue, juin 2009

Avantages / Inconvénients techniques de l'Acier en construction nautique

Avantages :

L'acier est facilement transformable par des opérations classiques de chaudronnerie : malléabilité, usinabilité, très bonne soudabilité (meilleure et plus facile à réaliser que pour l'aluminium notamment).

Il est résistant aux chocs et possède une très bonne durabilité si l'on sait traiter les problèmes de corrosion.

La réparation ou modification d'une coque en acier ne pose pas de problèmes particuliers.

Inconvénients :

Masse volumique élevée (7850 kg/m³, contre 2700 kg/m³ pour l'aluminium), et résistance spécifique faible : à solidité équivalente par rapport à une construction aluminium, le différentiel de poids sur une coque peut aller jusqu'à +50%. Il n'est donc pas du tout adapté à la réalisation de petites unités ou de multicoques.

Bilan environnemental de l'utilisation de l'acier en construction navale

Matériau

Le matériau est très abondant sur terre.

Le point négatif est la production du kg d'acier : coût énergétique et émissions de CO₂ (en Europe, 6% des émissions de CO₂ émanent de la sidérurgie).

L'utilisation d'acier recyclé peut permettre de réduire ces impacts. A titre d'exemple, la fabrication de conserves à partir d'acier recyclé au lieu de minerai de fer vierge permet d'économiser de 60 % à 70 % d'énergie. Le recyclage peut également réduire de 85 % la pollution de l'eau et de l'air.

La part de recyclé dans la production mondiale d'acier est évaluée entre 40 et 50%.

Pour prendre en compte ce scénario, il faudrait cependant vérifier si la construction nautique et/ou navale utilise réellement ou non de l'acier issu du recyclage.

Construction acier

La malléabilité et la bonne soudabilité de l'acier rendent son travail relativement aisé (usinage, chaudronnerie, etc.).

Du fait de sa masse volumique élevée, l'impact environnemental du transport de l'acier peut être important.

Utilisation / usage

Au niveau de la phase d'usage, l'acier demande qu'un faible entretien sauf pour la gestion de la corrosion.

Les structures et coques réalisées en acier sont « lourdes » en comparaison de constructions composites ou aluminium, d'où un surcroît de consommation énergétique pour la propulsion.

Fin de vie et recyclage

Comme pour l'alliage d'aluminium, l'acier mérite qu'on s'y intéresse dès la conception, car c'est une matière avec un important capital d'énergie emmagasiné pouvant être valorisé dans un nouveau cycle de vie.

L'acier possède des vertus magnétiques qui permettent sa séparation et sa récupération parmi des déchets de toute nature. Il peut se recycler indéfiniment et à 100 %, sans altération de ses qualités. Le recyclage permet de faire des économies de minerai, de chaux et d'énergie.

ACIER		
Aspects environnementaux	Faisabilité technico-économique	Acceptabilité sociale
<p>😊 Bon recyclage en fin de vie</p> <p>😊 Matériau en abondance</p> <p>☹️ Fort coût énergétique à la fabrication</p> <p>☹️ Maintenance et entretien élevé</p> <p>☹️ Plus lourd donc nécessite une propulsion plus importante.</p>	<p>😊 Bonne résistance mécanique : traction, dureté, élasticité</p> <p>☹️ Risque de rouille</p>	<p>☹️ Aujourd'hui peu de bateaux sont construits en acier.</p>

MATERIAUX

Lorsque nous calculons le bilan environnemental global d'un bateau, nous observons que les matériaux et les techniques de construction ont un impact fort sur l'environnement.

Pour évaluer l'impact réel d'un matériau, une analyse exhaustive, objective et sérieuse est nécessaire. Pour cela, plusieurs critères sont à prendre en compte : type de matériau, origine, disponibilité, poids, durée de vie, recyclabilité, toxicité, énergie consommée pour l'extraction, le transport et la transformation des matériaux, etc..

Il faut s'intéresser d'une part aux matériaux utilisés et d'autre part aux procédés de mise en œuvre.

Du point de vue de l'éconavigation, l'offre de choix proposée aujourd'hui, aux constructeurs et aux consommateurs, est relativement faible. Il est important d'inciter les industriels et les centres de recherche à travailler sur des nouveaux matériaux et produits d'entretien allant dans le sens d'une navigation durable.

Aménagement intérieur (isolation, décoration, sellerie...)

Matériaux d'isolation et de décoration

Dans le domaine de l'écohabitat, beaucoup de projets de recherches et développements sont en cours afin de trouver des matériaux isolants et décoratifs moins impactants sur l'environnement. Cependant dans le domaine maritime peu de choix s'offrent à nous aujourd'hui. Deux raisons semblent l'expliquer.

La première raison provient du fait que de nombreux matériaux naturels (ex : laine de cellulose, chanvre...) ne sont pas adaptés aux conditions en milieu marin (une humidité importante, salinité...).

La seconde raison est due à la faible demande des acteurs maritimes.

Actuellement les principaux isolants que l'on trouve sur les navires sont : la laine de roche, la laine de verre, les matériaux microporeux, le polyester, le polystyrène, le polyuréthane...

Tous ces matériaux majoritairement issus de l'industrie pétrolière possèdent un fort impact sur l'environnement. L'offre reste aujourd'hui très faible. Cependant certains matériaux comme le liège ou le bambou semblent être des pistes de recherche intéressantes.

Liège

Le liège, écorce du chêne-liège, arbre cultivé dans le bassin méditerranéen, est un tissu végétal composé de micro cellules.

Le liège est un produit totalement naturel, noble, renouvelable et biodégradable. Sa production génère de ce fait peu de pollution. Il est obtenu par écorçage du chêne-liège, sans abattement d'arbres, et lors d'une récolte qui ne se renouvelle que tous les 9 /12 ans.

Les chênes-lièges peuvent vivre 170 - 200 ans et, par conséquent, produire du liège entre 15 et 20 fois.

Isolant thermique et phonique naturel, ses caractéristiques lui permettent d'améliorer considérablement le confort de toutes coques : acier, aluminium, plastique ou encore bois.

Imputrescible il ne craint ni l'eau ni les températures extrêmes et reste insensible aux différents produits chimiques couramment utilisés sur les bateaux

Léger, résistant à l'usure, imperméable, élastique mais de dimension stable, le liège peut être une réponse aux diverses problématiques rencontrées dans la construction navale. Sur un bateau ses applications sont diverses :

- revêtement de pont
- régulateur thermique
- isolant acoustique
- vaigrage intérieur
- matériaux d'âmes des composites types construction sandwich...



© DR

En fin de vie les déchets de liège sont assimilés aux déchets de bois. Ils peuvent donc être recyclés ou valorisés énergétiquement. Le liège recyclé présente les mêmes caractéristiques que le liège de première utilisation.

Plus de renseignements :

Amorim Cork Composite: <http://www.amorimfrance.com/>

Revêtement de pont Seacork : <http://seacork.com>

Liège projeté, isolation bateau : <http://www.ecologicequipements.fr>

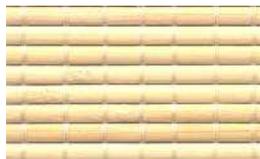
Natisol, matériaux d'isolation écologique : <http://www.natisol.be>

Liège projeté Subertres : <http://www.subertres-france.com>

Bambou

Léger, imputrescible et écologique, le bambou est un matériau à découvrir pour l'aménagement et la décoration intérieure des bateaux.

Différentes mises en œuvre permettent de l'utiliser pour les vaigrages, habillages ou même des stores. Il est cependant nécessaire de porter attention à l'origine géographique du bambou et de vérifier qu'il est bien issu de forêts gérées durablement. Le bambou a pour particularité de pouvoir être cultivé sur les cinq continents.



Natte bambou, BDF Douineau²⁵



Tissage bambou BDF Douineau

Bananier

Projet BELEAF²⁶ :

Conçu par Papyrus Australia Ltd et distribué par 3W S.A.M.TOUT BOIS, les panneaux de Beleaf sont fabriqués à partir de tronc de plants de bananier recyclés. Chaque plant de bananier, appelé techniquement « follower », ne produit qu'un seul et unique régime de bananes au cours de sa vie. Une fois les fruits récoltés, le plant coupé se transforme en déchets polluant en se décomposant, libérant une grande quantité d'anhydrides carboniques et méthane. Grâce au concept Beleaf ces déchets deviennent source de matières premières.

On obtient à partir du plant de bananier, des fibres compressées qui constituent la matière première, la base de confection des panneaux aux propriétés ignifuges, particulièrement résistant à l'eau et à juste titre idéal dans le secteur nautique.

La méthode de façonnage évite le gaspillage, emploie un minimum de réactifs chimiques et surtout réduit les consommations d'eau et d'énergie. Les plaquages et panneaux de bois ont été testés hautement résistants. Le plan de bananier libère naturellement une résine qui encolle les fibres excluant l'usage de produits artificiels.

Les applications sont multiples et variées. Les panneaux de Beleaf servent à l'assemblage des meubles, aux revêtements de décoration d'appartement, pour l'automobile, les bateaux...

Au niveau environnemental, ce produit permet de réemployer des déchets végétaux laissés par une autre production, donc de ne pas réaliser d'implantation supplémentaire de bananeraies et ainsi de diminuer la consommation d'énergie requise pour la fabrication ainsi que les émissions de CO₂.

D'un point de vue technique et environnemental ce matériau incontestablement innovant présente un potentiel intéressant.



© Eric Brossier - EcoTroll

²⁵ BDF Douineau, <http://www.bdf-douineau.com>

²⁶ Projet Beleaf, <http://www.beleaf.tm.mc/pagine/properties.shtml>

Sellerie

Les principaux matériaux utilisés actuellement pour la réalisation des tissus sont des matériaux synthétiques²⁷. Exemples : Skai (Tep : tissus enduit plastifié), Microfibres, Polyester, Dralon, PVC.

Les mousses sont souvent des composés issus de l'industrie pétrolière comme le polyamide.

Cependant certaines mousses utilisées peuvent être issues du recyclage du plastique (bouteilles, bidon ...).

Les produits naturels comme le coton bio ou le latex 100% naturels, ne sont malheureusement pas adaptés à une humidité importante et donc leur présence sur les bateaux est déconseillée²⁸.

Des pistes intéressantes semblent se développer concernant des mousses fabriquées à partir de soja.

En effet, la société Arcadia a récemment développé une mousse, distribuée par Cotte Martinon, qui incorpore dans sa formulation de nouveaux polyols d'origine végétale (soja) en substitution à des polyols issus de la pétrochimie. Cette mousse est destinée aux sièges et à la literie.

Cette mousse pourrait être utilisée pour une application en milieu marin. L'Ecotroll²⁹ est d'ailleurs équipé de ce type de produits.

Dans le domaine de la sellerie, les produits les moins impactants (ramené sur un certain nombre d'années) sont ceux qui ont une durée de vie importante. Nous pouvons également nous intéresser à l'origine de ces produits et mettre la sobriété en avant.

AMENAGEMENT INTERIEUR (isolation, décoration, sellerie...)		
Aspects environnementaux	Faisabilité technico-économique	Acceptabilité sociale
<p>☹ La plupart des matériaux présents sur le marché sont issus du pétrole donc impactants sur l'environnement. Ces matériaux posent également des problèmes vis-à-vis de leur disponibilité sur le long terme.</p> <p>😊 Quelques pistes intéressantes font leurs apparitions comme le liège, le bambou...</p>	<p>☹ Peu d'alternatives aujourd'hui</p> <p>😊 Privilégier les matériaux avec une durée de vie élevée</p>	<p>☹ Les matériaux isolants naturels dans le milieu maritime intéressent peu d'industriels du fait d'une faible demande.</p> <p>😊 Cependant on observe une prise de conscience notamment grâce aux démarches réalisées dans l'écohabitat.</p>

AMENAGEMENT INTERIEUR

L'impact environnemental des matériaux utilisés pour l'aménagement des bateaux est non négligeable et les alternatives techniques aux matériaux synthétiques, proposées par les professionnels, sont aujourd'hui très faibles.

En attendant que plus de solutions vertes soient proposées sur le marché notamment par le retour d'expériences de l'écohabitat, des efforts peuvent être réalisés sur la sobriété et la durée de vie des matériaux.

²⁷ Armor Sellerie fabricants de sellerie marine

²⁸ Biosense Bedding, fabricant de literies naturelles, <http://www.biosense.fr/>

²⁹ Ecotroll, Le Troller à Energies Contrôlées et Optimisées, <http://web.ecotroll.net/>

Architecture

L'évaluation de l'aérodynamisme et de l'hydrodynamisme a un effet important sur la consommation d'énergie nécessaire à la propulsion d'un bateau.

Moins le bateau présentera de frottement avec l'eau et l'air, moins celui-ci aura besoin d'énergie pour se déplacer.

Résistance à l'avancement

La résistance à l'avancement peut se décomposer en deux résistances, l'une de vague, l'autre visqueuse.

La résistance visqueuse est une fonction de la vitesse au carré et la résistance de vague une fonction de la vitesse au cube, la vitesse a donc un impact considérable sur l'augmentation de la résistance³⁰.

Résistance visqueuse

La résistance visqueuse est liée à la surface mouillée et la rugosité de la carène.

La rugosité de la carène est un point de contrôle important. Une dégradation de l'état de la carène (augmentation de la rugosité, salissure) se traduit par une augmentation de la résistance visqueuse ce qui entraîne un accroissement de la dépense énergétique.

L'autre point de contrôle est le safran. Sa surface doit être adaptée au navire, un trop grand safran pour une petite unité augmentera la surface mouillée donc la résistance visqueuse mais avec un safran trop petit, le navire risque de perdre en manœuvrabilité.

Résistance de vague

Deux points de contrôle : le déplacement et la forme de la carène, en particulier la forme sur l'avant. Le déplacement est défini comme le poids du volume d'eau correspondant à la carène du navire, il s'exprime en Newton. Ce poids est de la même grandeur que la poussée d'Archimède, elle-même égale au poids du navire. Un déplacement lourd génère un train de vagues plus important qu'un déplacement léger donc a une résistance de vague plus importante, il convient de recenser sur le navire les gains de poids que l'on peut réaliser afin de minimiser le déplacement...

Le but d'un bulbe est de réduire le champ de vague et ainsi diminuer la résistance de vague. Si le bateau ne dispose pas de bulbe d'étrave, en rajouter un, peut être efficace d'un point de vue économie d'énergie. Une étude préalable numérique ou en bassin des carènes est indispensable.

Quatre ratios majeurs peuvent être calculés pour apprécier l'efficacité d'une carène la Vitesse, la Trainée, la Longueur et le Volume.

Des études portant sur les performances hydrodynamiques d'une carène, en simulation numérique ou de manière plus approfondie en bassin des carènes sur une maquette, sont pratiquées quotidiennement par des bureaux d'études spécialisés ou des laboratoires de recherche universitaires. Ce type d'étude est donc immédiatement disponible sur le marché.

³⁰ Cahier des charges de diagnostic énergétique pour les bateaux de pêche maritime, Ministère de l'agriculture et de la pêche, 2008

Caractéristiques de la simulation numérique

Pour l'industrie navale, la simulation numérique est devenue un complément indispensable aux essais sur modèles, allant parfois jusqu'à les remplacer sur certains projets. Les bénéfices en termes de réduction des délais d'étude, d'amélioration des performances et de réduction des risques de conception sont alors très importants. Ces études permettent d'agir sur différentes thématiques³¹ :

Résistance :

Calculs de résistance à l'avancement sans ou avec appendices, à l'échelle réelle ou au modèle. Optimisation des performances hydrodynamiques de navires : minimisation de la résistance, de la puissance, du sillage, du champ de vagues ...

Propulsion :

Simulation d'autopropulsions permettant le calcul de la puissance propulsive, l'étude des interactions hélices / carène / appendices, le calcul du sillage, de la succion et du rendement de coque.

Résistance ajoutée et tenue à la mer :

Calculs de résistance ajoutée et de mouvements sur houle régulière ou irrégulière, mono ou multidirectionnelle.

Manœuvrabilité :

Calculs de coefficients de manœuvrabilité en dérive, giration ou dérive et giration combinées.

A travers la démarche d'éconavigation, nous souhaitons mettre en avant les études permettant d'adapter les carènes à l'utilisation (nombre de personnes à bord, vitesse moyenne, vitesse maximum, période de navigation, bassin de navigation...).

Il est important d'indiquer qu'une bonne tenue à la mer et une bonne manœuvrabilité du navire sont essentielles pour la sécurité en mer du fret, du bateau, des autres bateaux et des hommes.

Une bonne maîtrise du bateau permet également d'éviter du risque de pollution accidentelle suite à une collision, un naufrage ou la perte de conteneurs en mer.

Exemple de procédés pour optimiser le rendement de la carène

La consommation en combustible d'un navire dépend directement de la résistance à l'avancement de sa carène. Tout procédé améliorant le rendement de la carène et de l'hélice sera donc bénéfique pour l'environnement en engendrant une baisse de la consommation de carburant.

Les multicoques

Pour diminuer le champ de vague il faut s'orienter vers des carènes fines. Les multicoques permettent de répondre à cette problématique.

Les multicoques génèrent moins de déplacement d'eau et possèdent donc des performances plus élevées. Cependant ceux-ci ont un coût généralement plus élevé.

Dans la famille des catamarans, les architectures de type Waves Piercer se dégagent de plus en plus. (Exemple projet Planet Solar). Les trimarans et les pentamarans sont également de plus en plus présents dans les projets futuristes. (Exemple : pentamaran Orcelle et pentamaran Eoseas de STX).

³¹ Hydrocean, <http://www.hydrocean.fr/>

Le bulbe d'étrave

Le **bulbe d'étrave** est une solution déjà adoptée par de nombreuses compagnies pour réduire le phénomène de vague d'étrave, mais certaines continuent d'améliorer la forme de ces bulbes, ce qui permet d'arriver à des économies de carburant plus importantes.

C'est le cas de Maersk Line, qui annonce des économies de 5% suite aux essais de nouveaux bulbes d'étrave, qui seront donc adaptés sur tous les navires de la compagnie.

Le **projet Bulbe**, porté par la société Jean&Frasca, a pour objectif la création d'un outil numérique paramétrique pour optimiser les bulbe d'étrave. Ce projet labellisé en juin 2009 par le Pôle Mer PACA est cofinancé par la Direction des pêches maritimes et de l'aquaculture via l'Appel à projets « Réduction de la dépendance des navires de pêche au gazole ».

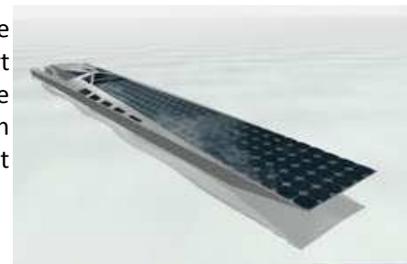
Modification de l'étrave

De nouvelles formes d'étrave font leur apparition pour améliorer le passage dans la vague, tout en conservant la même résistance sur eau plate qu'avec les étraves classiques. Parmi elles, les « Axe Bow » et « Ledge Bow » développés par la « Universal Shipbuilding Corporation »³² présentent des résultats intéressants.



Bateau à effet de surface

La société bordelaise Hull Concept travaille également sur un projet de bateau léger et rapide (pouvant atteindre 60 nœuds) destiné au transport de marchandises. Ce navire ayant un très faible tirant d'eau, et une architecture très aérodynamique, évoluera majoritairement dans l'air et non pas dans l'eau, ce qui entraînera un gain d'énergie important. Ce projet repose sur le principe d'effet de surface.



© Hull Concept

Nappe d'air sous la coque

Des projets portent aujourd'hui sur la réduction des forces de frottement par création d'une nappe de micro bulles de gaz (souvent de l'air) à l'avant du navire et qui, par sillage, recouvre une bonne partie du fond du navire. Les tests réalisés laissent entrevoir un gain global en énergie de propulsion de 5 à 10 %, auquel il faut soustraire l'énergie nécessaire pour produire les bulles, ce qui donne un gain global de 2 à 5 %. La mise au point de ces systèmes n'est pas terminée et des gains supérieurs peuvent être attendus. Les coques massives de gros porteurs (vraquiers, pétroliers) semblent être celles qui bénéficieraient le plus de ce procédé³³.

³² Universal Shipbuilding Corporation, http://www.u-zosen.co.jp/html_e/index.html

³³ Stenabulk, <http://www.stenabulk.com/E-MAXair>

Autres projets de recherche

Le projet OPTNAV, porté par la société HydrOcean, en collaboration avec le chantier de construction navale STX France, l'École Centrale Nantes, le Bureau Veritas et la société Sirehna, vise à optimiser les performances hydrodynamiques des navires pour améliorer leurs performances et réduire leurs consommations énergétiques.

Les méthodes actuelles permettent d'optimiser dans des cas simplifiés la résistance à l'avancement d'une carène, cependant des gains de performance importants sont attendus en optimisant les interactions entre la coque, le ou les propulseurs et les appendices, en présence de houle.

Pour y parvenir, les partenaires du projet OPTNAV vont développer et mettre en place une chaîne d'optimisation incluant ces outils et utilisable sur n'importe quel type de navire sans limitation particulière. Elle pourra intégrer des spécificités métier comme certaines contraintes architecturales pour des paquebots de croisière, et rapidement intégrer d'autres outils de simulation ou de conception (contraintes architecturales, coûts de fabrication, stabilité ...).

Le projet OPTNAV, labellisé par le Pôle Mer Bretagne, est aussi labellisé par le Pôle EMC2 (Région Pays de Loire).

De nombreuses autres solutions permettent d'améliorer le rendement d'une carène dont notamment l'application d'antifouling (Cf. chapitre antifouling) ou le recours à des hélices hautes performances, la réduction de la vitesse, etc. (Cf. chapitre propulsion-solutions alternatives).

ARCHITECTURE DES NAVIRES

L'architecture navale a des conséquences importantes sur l'aérodynamisme et sur l'hydrodynamisme des bateaux et donc un lien direct sur l'énergie nécessaire à la propulsion du navire.

Il est essentiel d'avoir une architecture adaptée au type de bateau et à son programme de navigation afin de réduire la pollution à la source.

Pour cela les architectes peuvent avoir recours à des logiciels informatiques ou réaliser des tests en bassin de carène.



PlanetSolar; ©Oceoprtext

Gestion de l'environnement dans les chantiers

Gestion globale de l'environnement

Nous observons aujourd'hui une prise de conscience concernant la nécessité d'améliorer la gestion de l'environnement dans les chantiers navals. Cette démarche permet, entre autres, de respecter la réglementation en vigueur, d'améliorer son image, éventuellement de trouver de nouveaux clients, d'améliorer la productivité et de réduire les coûts de productions.

Lorsque que nous nous intéressons à l'environnement en général et plus particulièrement dans un chantier naval, de nombreux thèmes sont à aborder : air, eau, sol, énergie, déchets, bruit, pollution visuelle, patrimoine bâti, santé des opérateurs...

La sécurité du personnel ainsi que la qualité du service sont également des facteurs intéressants à prendre en considération.

Aujourd'hui il existe des normes et des certifications permettant d'aider la direction du chantier à mettre en place une gestion de l'environnement sur leur site.

La norme ISO 14001 est une des plus connues.

Norme ISO 14001

La norme ISO 14001 s'applique aux aspects environnementaux que l'organisme peut maîtriser et sur lesquels il est censé avoir une influence. En ce sens, elle n'instaure pas en elle-même de critères spécifiques de performance environnementale.

La norme ISO 14001 repose sur le principe d'amélioration continue de la performance environnementale par la maîtrise des impacts liés à l'activité de l'entreprise. Celle-ci prend un double engagement de progrès continu et de respect de la conformité réglementaire.

Elle permet de bien structurer la démarche de mise en place d'un système de management environnemental, d'en assurer la traçabilité et d'y apporter la crédibilité découlant de la certification par un organisme extérieur accrédité.

La norme ISO 14001 est un des éléments du trio ISO 9001 (qualité), ISO 14001 (environnement), OHSAS 18001 (sécurité).

Norme ISO 26000

L'ISO 26000:2010³⁴ a vocation d'aider les organisations à contribuer au développement durable. Elle vise à les encourager à aller au-delà du respect de la loi, tout en reconnaissant que le respect de la loi est un devoir fondamental pour toute organisation et une partie essentielle de sa responsabilité sociétale. Elle a vocation à promouvoir une compréhension commune dans le domaine de la responsabilité sociétale et à compléter les autres instruments et initiatives de responsabilité sociétale, non à les remplacer.

Lors de l'application de l'ISO 26000:2010, il est recommandé que l'organisation prenne en considération les différences sociétales, environnementales, juridiques, culturelles, politiques et la diversité des organisations ainsi que les différences de conditions économiques, en toute cohérence avec les normes internationales de comportement.

Ces normes ISO demandent un investissement financier et humain relativement important. Du coup, celles-ci ne sont pas toujours accessibles aux petites et moyennes entreprises.

Cependant des efforts sont réalisés pour permettre d'aider les PME à respecter l'environnement. Par exemple l'Ademe développe des outils d'aide aux PME pour aller vers une certification ISO 14001 et la Chambre Régionale de Métiers et de l'Artisanat de Bretagne a développé un système d'aide à la gestion des déchets, destiné aux professionnels du nautisme.

³⁴ Organisation internationale de normalisation, <http://www.iso.org>

Certification environnementale dans un domaine précis

Certaines certifications ou labels concernent uniquement un domaine précis. Parmi elles, la marque « Vague Bleue » qui concerne la gestion des déchets dans les chantiers de « petites » tailles.

Marque Vague Bleue

Vague Bleue³⁵ est la première action collective lancée en France et dédiée à la filière artisanale nautique. Elle s'inscrit dans le cadre du programme ENVIR'A, programme environnement de l'artisanat breton et plus largement dans le cadre du plan d'action nautisme mis en place en partenariat entre la Chambre Régionale de Métiers et de l'Artisanat de Bretagne et le Conseil Régional.



La Chambre Régionale de Métiers et de l'Artisanat de Bretagne, par l'intermédiaire de la marque vague bleue, offre aux entreprises :

- un stockage avec des contenants adaptés à l'entreprise
- une collecte par des prestataires locaux spécialisés
- une élimination dans des installations autorisées
- une traçabilité assurée
- une aide financière de l'Agence de l'Eau Loire Bretagne
- une valorisation de l'engagement du professionnel auprès de sa clientèle

En signant la charte Vague Bleue, le professionnel du nautisme s'engage à :

- justifier l'élimination conforme de ces déchets
- respecter des conditions de stockage des déchets dangereux garantissant le respect de l'environnement
- respecter l'interdiction de brûlage à l'air libre de tout type de déchets.

Une fois la marque Vague Bleue obtenue, l'entreprise dispose d'outils de communication pour ses salariés, sa clientèle et le grand public (panneaux de tri, logo, affiche, plaquette, flyer, adhésif véhicule, Etc.). Ces supports de communication permettent à l'entreprise de présenter son engagement, de sensibiliser ses clients, de valoriser son professionnalisme et de se différencier.

Au mois d'octobre 2010, 100 entreprises exerçant l'activité d'entretien et/ou réparation et/ou construction dans le secteur du nautisme sont devenues titulaires de la marque en Bretagne.

Ces entreprises bretonnes sont engagées dans une démarche de tri et d'élimination des déchets.

Vague Bleue Carénage est la 2^{ème} action collective du programme Action Nautisme mise en place par la Chambre Régionale de Métiers et l'Artisanat de Bretagne et la Région Bretagne, enrichie d'un partenariat avec la Chambre Régionale de Métiers et de l'Artisanat des Pays de la Loire et de l'Agence de l'Eau.

Ce programme obéit aux mêmes règles déontologiques que « Vague Bleue gestion des déchets » et consiste à implanter des aires de carénages dans les chantiers navals de maintenance avec traitement de la dépollution.



³⁵ Marque Vague Bleue, <http://www.bretagne-info-nautisme.fr/-La-marque-Vague-Bleue-.html>

Exemple d'initiatives environnementales dans les chantiers navals

STX Europe

STX Europe³⁶ est soucieux de réduire l'impact de son activité sur son environnement.

Les équipes du service HSE (Hygiène, Sécurité, Environnement) du chantier STX Europe travaillent ainsi sur plusieurs axes pour faire des sites français des modèles dans le domaine. Les sources de pollution sont identifiées (produits chimiques, hydrauliques, déchets divers) et des moyens permettant de les contrer ont été mis en place. Cette démarche est encadrée.

Le site de Saint-Nazaire est certifié ISO 14001.

Les différentes actions menées concernent :

- Réduction d'émission de COV (Composés Organiques Volatiles)
- La pollution de l'eau
- La Protection des sols
- Les déchets

Toutes ces actions font l'objet d'une campagne d'information pour sensibiliser toutes les personnes présentes sur les sites de STX Europe au respect de l'environnement, pour que chacun reste écologiquement responsable et que les investissements consentis se révèlent pleinement efficaces.

DCNS

Depuis plus de dix ans, **DCNS** a adopté une approche environnementale dans la gestion de ses activités industrielles. Il devient aujourd'hui le premier groupe industriel européen de défense à être certifié ISO 14001 avec un système de management unique pour tous ses centres. DCNS prouve ainsi son dynamisme en tant que leader de l'industrie navale européenne engagé dans la protection de l'environnement.

La démarche environnementale de DCNS s'est également développée dans le domaine de l'éco conception des navires.

Chantier Naval Esterel

Le Chantier naval Esterel³⁷, situé sur un site sensible, l'île Ste Marguerite, à proximité immédiate du Fort, s'est engagé dans la mise en place d'un système de gestion de l'environnement avec pour objectif l'obtention et le maintien de la certification ISO 14001.

Cet objectif a été atteint en octobre 2006. Aujourd'hui le chantier est audité annuellement par l'organisme accrédité AFAQ-AFNOR Certification qui conseille, contrôle et valide les actions d'amélioration et leurs résultats.

Les chantiers Jeanneau

Depuis 2004, **les chantiers Jeanneau**³⁸ sont certifiés ISO 14001. Le site industriel des Herbiers, siège des Chantiers Jeanneau, s'est engagé dans une démarche de maîtrise des conséquences environnementales de sa production. La gestion de l'énergie, des déchets recyclables ou de l'émanation de C.O.V fait, entre autres, l'objet d'un plan pluriannuel d'investissements dans lequel s'implique l'ensemble de ses collaborateurs.

Cette démarche vient compléter la "démarche qualité" engagée avec la certification ISO 9001 maintenue depuis 1995.

³⁶ Chantier STX Europe, <http://www.stxeurope.com/>

³⁷ Chantier Naval Esterel, <http://www.chantier-naval-esterel.com/fr>

³⁸ Chantier Jeanneau, <http://www.jeanneau.fr/>

Monaco Marine

Le secteur de la grande plaisance est également touché par cette vague verte.

Les propriétaires de super-yachts se sentent de plus en plus concernés par l'impact environnemental de leur bateau. C'est la nouvelle tendance dans ce secteur. De plus en plus de chantiers multiplient les initiatives pour rester à la pointe. C'est le cas notamment de **Monaco Marine**³⁹, à la Ciotat qui a obtenu, fin 2009, la certification ISO 14001.

GESTION DE L'ENVIRONNEMENT DANS LES CHANTIERS

L'activité générée par les chantiers navals a un impact non négligeable sur l'environnement. De nombreuses thématiques peuvent être abordées : air, eau, sol, énergie, déchets, bruit, pollution visuelle, patrimoine bâti, santé des opérateurs...

De plus en plus de chantiers souhaitent, aujourd'hui, s'engager dans une démarche environnementale afin de réduire leur impact sur le milieu maritime, d'améliorer leur image de marque et éventuellement de réduire les coûts de production.

Mettre en place une démarche environnementale globale, comme l'ISO 14001 sur un chantier, a souvent un coût humain et économique non négligeable, qui ne peut pas toujours être assumé par les petites et moyennes entreprises. Pour cette raison, quelques initiatives comme l'opération « Vague Bleue » destinée à aider les PME pour diminuer leur impact environnemental, font leur apparition et obtiennent un grand succès auprès de ces entreprises. Il serait souhaitable que ce genre d'initiative se développe sur l'ensemble du territoire français.



³⁹ Chantier Monaco Marine, <http://www.monacomarine.com>

Eco-conception et Analyse du cycle de vie d'un produit

L'éco-conception consiste en la prise en compte de l'impact environnemental d'un produit dès sa conception. Il est important d'agir le plus en amont possible afin d'avoir une véritable approche préventive des impacts sur l'environnement.

Une des notions essentielles de l'éco-conception est l'analyse du cycle de vie d'un produit.

Les raisons pour lesquelles les entreprises s'engagent dans une démarche d'éco-conception sont les suivantes :

- Anticipation de l'évolution de la réglementation
- Réponse à l'évolution du marché
- Réduction des coûts pour l'entreprise
- Amélioration de la performance et l'image de l'entreprise
- Développement d'un argumentaire commercial

Depuis quelques temps les démarches d'éco-conception dans le milieu maritime se font de plus en plus nombreuses.

Démarches allant dans le sens d'une navigation durable

Le Chantier naval Dubourdieu

Le chantier naval Dubourdieu 1800 construit des bateaux bois à moteur sur mesure et à l'unité, pour un usage plaisance ou professionnel. Engagé dans l'éco conception de bateaux via son projet GREENBOAT®, le chantier Dubourdieu a pour objectif de limiter l'impact environnemental des bateaux sur l'ensemble de leur cycle de vie.

Le projet GREENBOAT® s'appuie dans un premier temps sur les matériaux et technologies les plus durables, en privilégiant par exemple l'utilisation d'essences de bois locaux. Il réalise une recherche de fond sur les matériaux à base de pin maritime dans le cadre d'un projet collaboratif.

Le chantier Dubourdieu réalisera un éco-profil comparatif (avec un bateau à passagers remplissant le même usage/les mêmes conditions d'exploitation) afin de chiffrer son impact environnemental.

La première réalisation du projet sera un bateau de transport à passagers (50 personnes) à destination du Bassin d'Arcachon.



© Chantier Dubourdieu

Chantier Icarai

Icarai⁴⁰ est un petit chantier naval installé près de Cherbourg. Le chantier produit essentiellement des bateaux en « bois moderne », de petites tailles (le plus grand au catalogue mesure 8,40 m) et transportables. D'apparence traditionnelle, ils sont « innovants et durables, pour des clients avertis ».

Afin de diminuer l'impact environnemental de ses bateaux, Nicolas Vivier, a demandé au pôle éco-conception de la technopole Cherbourg Normandie de réaliser un diagnostic sur l'un de ses bateaux. Tous les aspects sont pris en compte : la structure, le type de bois, le vernis, la peinture, la durée de vie du bateau et sa déconstruction...

L'étude a été réalisée sur un bateau de type voile-aviron de 3m60 pouvant embarquer 3 personnes. L'objectif de ce diagnostic est d'identifier les points les plus impactants tout au long du cycle de vie ainsi que leur potentiel d'amélioration. Cette étude a donc permis d'identifier les pistes d'amélioration où il semble le plus pertinent d'agir.

Chantier Naviwatt

Naviwatt⁴¹ est une jeune société de conception, fabrication et commercialisation de bateaux électriques pour la plaisance. Yannick WILEVEAU a conçu un navire au concept novateur destiné à la balade côtière: le Zéphyr 570. Ce bateau propose une alternative aux engins sur-motorisés conçus pour relier un point A à un point B en un minimum de temps. Les coques du Zéphyr ont été étudiées pour offrir une résistance à l'avancement minimale lorsqu'il navigue. De ce fait, il a besoin de peu d'énergie pour avancer et génère peu de vagues.

Dans cette démarche d'éco-conception, Naviwatt a souhaité évaluer l'impact sur l'environnement de différents scénarios de matériaux de construction afin d'orienter son choix de production en série.



Le Zéphyr

Cette Analyse du cycle de vie a été réalisée en partenariat avec l'Université de Bretagne Sud.

Cette étude a permis d'identifier les principales pistes d'amélioration et d'identifier les phases du cycle de vie du bateau les plus impactantes en fonction du type d'utilisation du bateau (usage prévu pour un particulier comparé à l'usage prévu pour un loueur de bateaux).

Chantier STX, concept EOSEAS

STX France⁴², a lancé avec la coopération de la société Stirling Design International l'étude d'un navire de croisière éco-conçu. EOSEAS®, pentamaran de 305 mètres de long et 60 mètres de large, est un véritable concentré des propositions environnementales développées par STX France à Saint-Nazaire. Ce navire a, entre autre, recours :

- aux énergies alternatives pour la propulsion assurée par des voiles couvrant une surface de 12.440m² sur 5 mâts.
- à l'utilisation de gaz naturel pour le fonctionnement de générateurs de nouvelle génération assurant l'alimentation en électricité du navire et la production de chaud et froid.
- à l'optimisation des caractéristiques hydrodynamiques avec l'utilisation d'un film d'air sous la coque principale.

⁴⁰ Chantier naval Icarai, <http://www.icarai.fr/>

⁴¹ Société Naviwatt, <http://www.naviwatt.fr/>

⁴² STX Europe, <http://www.stxeurope.com/>

ECOSHIP : Démarche éco-conception par DCNS

Au cœur de son projet de développement durable, **DCNS**⁴³ a développé une politique environnementale afin de contrôler et de diminuer l'impact sur l'environnement de ses activités et de ses produits. Ainsi, en complément de la mise en place d'une organisation et d'un système de management conformes à la certification ISO 14001, la démarche d'éco-conception prend en compte l'environnement sur l'ensemble du cycle de vie d'un navire, de sa construction à son démantèlement en passant par son exploitation et sa maintenance.

Le concept ECOSHIP, démontre la possibilité de concevoir un navire dont l'impact environnemental global est diminué de 50% en utilisant des technologies sur étagère et avec un surcoût d'acquisition amorti sur 5 ans sans modifier ses performances opérationnelles. Pour y parvenir, une coque en aluminium, plus légère et donc nécessitant moins de puissance propulsive, a été retenue.

Pour diminuer la consommation électrique, les ingénieurs ont repris la technique de la ventilation double flux, permettant de limiter les dépenses énergétiques.

EcoAdvance Vendée Globe 2012

La société Quantis⁴⁴ travaille sur le projet « **EcoAdvance Vendée Globe 2012** » en partenariat avec Charles Caudrelier⁴⁵. L'objectif de cette démarche est de quantifier et de définir les moyens qui permettent de réduire l'impact environnemental de l'ensemble d'un projet de type Vendée Globe. Pour cela Quantis s'intéresse à la construction du bateau mais également à l'impact environnemental du aux transports, aux vêtements, à la communication, à la logistique, à la nourriture...

L'objectif principal du projet est de « Remporter l'édition 2012 du Vendée Globe en essayant d'y réduire au maximum l'impact environnemental ».

Projet CONVENAV

Le projet CONVENAV⁴⁶, comme CONception et cycle de Vie Environnemental des NAVires, porté par la DCNS, vise à réduire l'impact environnemental des navires en développant des outils innovants. Ils permettront, dès la conception, mais aussi durant l'exploitation, les phases de maintenance ou de modification et lors de la déconstruction, d'évaluer et de réduire les impacts environnementaux des navires et faciliteront, grâce à la modélisation, un contrôle pour chacune de ces phases. Ces outils seront utilisés par l'architecte, le constructeur, les équipementiers et les exploitants. Ils pourraient aussi servir à des sociétés de classification comme support d'une démarche d'éco-labellisation.

CONVENAV a obtenu un soutien financier de l'Agence Nationale de la Recherche au titre de son appel à projets PRECODD, Programme Ecotechnologies et Développement Durable ainsi que du Pôle Mer Bretagne.

Accompagnement des petites structures dans une démarche d'éco-conception

Afin d'accompagner les petites structures dans une démarche d'éco-conception, certaines régions ont mis en place un accompagnement spécifique. Ainsi la Technopole Cherbourg Normandie propose un diagnostic d'éco-conception, à la fois qualitatif (check-list des pressions internes et externes) et quantitatif (utilisation de l'outil Bilan Produit de l'ADEME), permettant de comprendre les impacts environnementaux d'un produit. L'objectif de cette évaluation est de donner des pistes d'amélioration simple par rapport à la taille de l'entreprise, par exemple des gains énergétiques, de matières premières ou utilisation de nouveaux éco-produits.

⁴³ DCNS, <http://www.dcnsgroup.com/>

⁴⁴ Société Quantis, <http://www.quantis-intl.com/>

⁴⁵ Site internet de Charles Caudrelier, <http://www.charlescaudrelier.com/>

⁴⁶ Présentation projet Convenav, <http://www.pole-mer-bretagne.com/convenav.php/>

Projet « Sustainable Ship Design »

En 2008, Néopolia a missionné Stirling Design International et le cabinet conseil en éco-conception EVEA pour la réalisation du projet et de l'outil d'analyse de cycle de vie spécialement adapté au secteur naval.

Les chantiers STX, DCNS, Saint Nazaire Marine, les bureaux d'études d'ingénierie navale Ship Studio et STX Solutions ainsi qu'une dizaine de PME de Loire Atlantique ont activement participé au développement du logiciel, en apportant leur expertise spécifique et leur point de vue d'utilisateur.

L'outil SSD47 « Sustainable Ship Design » est un outil d'Analyse du Cycle de Vie (ACV) destiné au secteur naval. Il permet de mesurer les impacts sur l'environnement d'un navire ou d'un sous-ensemble du navire, de déterminer les éléments à fort impact environnemental, et d'effectuer des comparaisons quantifiées entre différentes technologies, sur l'ensemble du cycle de vie du navire. Réalisé sur la base du logiciel SimaPro, cet outil d'ACV rassemble les matériaux et procédés spécifiques à la filière navale civile et militaire, utilisés aussi bien en phase de construction que d'utilisation des navires.

L'outil a été testé sur plusieurs navires tels que :

- un navire MSC (Q32 MSC MUSICA) de STX France
- une frégate type Lafayette de la DCNS
- un voilier de charge de 47 mètres conçu par Ship Studio

SSD est en effet le premier logiciel d'analyse de cycle de vie spécifiquement adapté au secteur maritime à être commercialisé.

Cap Vert

La société EVEA travaille, en collaboration avec l'Université de Bretagne Sud, sur un projet intitulé **CAP VERT** (Conception Assistée pour une Plaisance VERTE), et qui vise à développer des outils d'aide à l'éco-conception adaptés aux spécificités de la construction nautique et destinés aux professionnels de la filière (architecte, chantiers, équipementiers, concessionnaires, port de plaisance, etc.).

Ces outils interactifs se présenteront sous forme de logiciels accessibles via Internet.

Ils serviront également de support à un programme de sensibilisation et de formation des acteurs de la filière, aux concepts, enjeux, et méthodologies, de l'analyse d'impacts environnementaux des produits et de l'éco-conception.

Une déclinaison 'grand public' est envisagée : elle permettrait au plaisancier d'évaluer les impacts générés par sa pratique de la plaisance.

ECO-CONCEPTION ET ANALYSE DU CYCLE DE VIE D'UN PRODUIT

L'éco-conception est une démarche apparue récemment mais qui intéresse de plus en plus de chantiers. Celle-ci permet de réduire à la source l'impact environnemental des produits.

L'éco-conception est une démarche assez lourde à mettre en place qui demande du personnel qualifié. De ce fait, elle ne peut pas être appliquée par de nombreux petits chantiers sans que ceux-ci soient accompagnés dans leur démarche.

⁴⁷ Présentation de l'outil « Sustainable Ship Design », <http://sustainableshipdesign.com/>

Chapitre 2 - Propulsion, Equipements et Entretien

Propulsion

Propulsion Vélique

Description technique

La propulsion à la voile est, bien sûr, un mode de propulsion à promouvoir, pas d'émission de CO₂, consommation d'énergie naturelle, peu de nuisances sonores...

Cependant, contrairement aux idées reçues, la voile nécessite des ressources pour la fabrication et le renouvellement des différents composants (en particulier gréement courant et voiles). Aujourd'hui, les principaux matériaux utilisés pour la fabrication des voiles sont les fibres synthétiques plus performantes et moins chères que les fibres naturelles qu'elles ont remplacées au cours du temps.

Performances environnementales

Le confort de son utilisation et l'énergie issue du vent font de la propulsion à la voile un des moyens de locomotion le moins impactant sur l'environnement. Cependant, il faut tenir compte des matériaux qui servent à la fabrication des voiles et du gréement. Les fibres naturelles (lin, chanvre, coton) sont de moins en moins utilisées, car elles sont relativement chères, moins performantes et moins résistantes que celles fabriquées en fibres synthétiques. Il est également nécessaire de tenir compte des matériaux, de l'origine, et de la durée de vie du gréement et de l'accastillage.

Contrairement aux idées reçues, l'utilisation de voile en fibres naturelles telle que le coton (dans les conditions de production actuelle), ne génère pas moins d'impact sur l'environnement que les fibres synthétiques. En effet la production de coton nécessite des traitements chimiques conséquents qui ont un impact important sur l'écotoxicité aquatique.

Les fibres synthétiques ont donc un meilleur rendement et sont plus solides. Leur gestion en fin de vie est à prendre en compte car elles sont difficilement recyclables une fois arrivées au terme de leur utilisation. Elles peuvent cependant être réutilisées, pour fabriquer des objets à base de tissu comme des sacs de toile par exemple.



©EcoNav

Description économique

Généralement plus une voile sera performante (régate), plus son coût sera élevé et sa durée de vie sera faible. Les voiles en matières naturelles sont également plus chères que les voiles synthétiques, en nylon ou en polyester.

La présence de voile sur certains navires génère une charge de travail supplémentaire, un équipage plus important et donc des coûts d'exploitation plus élevés. Cependant de nouveaux systèmes automatisés pour le réglage des voiles se développent et permettent de réduire ce surcoût d'exploitation.

Domaine d'application, flotte concernée

Aujourd'hui la voile est principalement utilisée dans le domaine de la plaisance.

L'époque de la marine et de la pêche à la voile a pratiquement disparu depuis l'apparition des moteurs thermiques cependant depuis quelques années des projets de transport de marchandises à la voile (cf. partie exemples d'applications), ou d'implantation de voiles auxiliaires sur des bateaux de pêche (cf. partie propulsion hybride) refont surface.

Horizon technique

La diminution de la consommation d'énergies fossiles est à envisager, que ce soit d'un point de vue économique ou environnemental. La voile est une des solutions qui peut efficacement tendre vers cette réduction. C'est pourquoi davantage d'innovations sont proposées pour que les navires utilisent la force du vent. De nombreux efforts sont également nécessaires pour diminuer l'impact environnemental des différents matériaux utilisés dans la construction des voiles.

Il serait intéressant de réaliser des recherches sur l'utilisation de fibres naturelles renforcées ou des conceptions intelligentes de voiles en fibres naturelles qui seraient renforcées là où il y en a réellement besoin.

Démarches allant dans le sens d'une navigation durable

Exemple de projet de transport maritime à la voile

La société CTMV⁴⁸ (compagnie de transport maritime à la voile) exploite actuellement une flotte de navires marchands à voile. Leur entreprise propose un moyen de transport innovant, moderne et moins impactant sur l'environnement, utilisant les énergies renouvelables. CTMV et sa filiale FairWindWine ont ouvert une première ligne Bordeaux-Dublin, sur l'un des marchés les plus porteurs d'Europe, l'Irlande.

Cargo Voile Multiservice

L'objectif du projet **Cargo Voile Multiservice** est de proposer une solution environnementale aux navires actuels de transport et de travaux maritimes, avec la conception, la construction et l'exploitation d'un navire de charge à voile moderne, innovant, économique, polyvalent et utilisant les énergies renouvelables en propulsion.

L'entreprise Cargo Voile Multiservice a été sélectionnée lors d'un appel à projet « Plan Energie Martinique 2009 » organisé par la délégation régionale de l'agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) et subventionné par le Fond Européen de Développement régional.

Projet Transport Cohérence

Guillaume Torrent travaille sur un projet de transport maritime à la voile intitulé « **Transport Cohérence** ». L'objectif est le transport maritime à la voile de marchandises, associé à l'accueil de professionnels des sciences humaines.

⁴⁸ Société CTMV, www.ctmv.eu

Exemple de projet de recyclage de voile

727 Sailbags⁴⁹ est une entreprise basée à Lorient, spécialisée dans le recyclage de voile pour en faire des sacs, des transats, ...

Pour recycler des voiles 727 Sailbags s'entourent de particuliers et de professionnels. Les partenaires sont aussi bien les plaisanciers et les régatiers que les coureurs aux multiples traversées. Ce sont également les entreprises et les collectivités, tout comme les nombreux professionnels du Nautisme : loueurs de bateaux, Yacht Club, Ports... ou encore des voileries.

Produits d'accastillage

Karver⁵⁰ est une PME d'une dizaine de salariés qui conçoit et produit de l'accastillage haut de gamme. Karver ne cesse d'innover depuis 6 ans dans le but d'offrir des produits toujours plus performants aux navigateurs. Consciente qu'il est important de produire avec un minimum d'impact sur l'environnement, l'équipe Karver travaille sur un projet d'éco conception de ses produits qui consiste à remplacer les matières plastiques par du composite biosourcé.

D'autres exemples de projets de propulsion vélique allant dans le sens d'une navigation durable sont détaillés dans le chapitre « propulsion hybride thermique-éolien ».

Remarques : Il est important de préciser qu'aujourd'hui, dans le secteur de la plaisance, les voiliers de croisières naviguent, en moyenne, 60% du temps au moteur.



© VAN MALLEGHEM François

⁴⁹ Société 727sailbags, <http://www.727sailbags.com>

⁵⁰ Société Karver, <http://www.karver-systems.com/>

Propulsion Thermique

Description technique

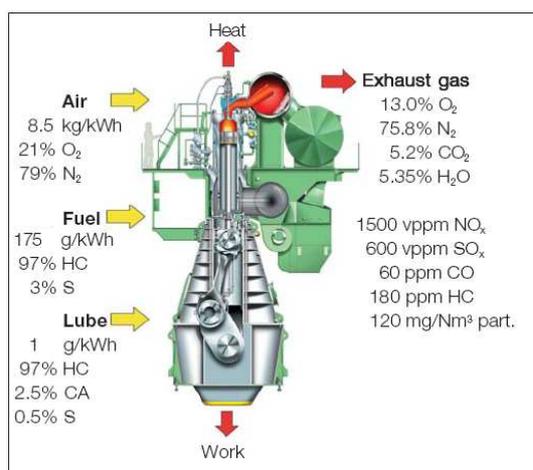
Le moteur thermique est utilisé dans tous les secteurs de la marine, il reste aujourd'hui une bonne solution technique pour propulser efficacement un navire. La tendance est néanmoins à la réduction des rejets gazeux et de la consommation de carburant qui sera de plus en plus rare et cher.

Aujourd'hui, la palette des moteurs hors bord 2 temps et 4 temps est très large et permet de convenir aux besoins de tous les utilisateurs dans le secteur de la plaisance.

Les moteurs 2 temps à injection ont une consommation plus faible que les moteurs 2 temps à carburateur. Les moteurs 2 temps sont plus nerveux au démarrage (1 course motrice/tour) et ont un poids réduit par rapport aux 4 temps. Car pour obtenir la même puissance avec un 4 temps (1 course motrice pour 2 tours), il faut augmenter l'alésage et/ou la course. La mécanique des moteurs 2 temps est un peu plus fragile, et nécessite un entretien régulier. La mécanique thermique offre par ailleurs un rendement d'environ 30-40% (données variables selon les sources et le type du moteur).

Performances environnementales

Le schéma ci-dessous donne une idée des flux gazeux et énergétiques dans un moteur diesel 2 temps suralimenté à combustion interne utilisé dans la marine commerciale⁵¹ :



Le combustible utilisé est issu du pétrole, une énergie non renouvelable qui génère, en autres, des polluants atmosphériques ainsi qu'un risque de pollution maritime par hydrocarbures. Comme on peut le voir sur le schéma ci-dessus, de nombreuses émissions gazeuses sont liées à l'utilisation de ces moteurs, ce qui provoque de forts impacts sur l'atmosphère. Le dioxyde de carbone (CO₂), l'oxyde de carbone (CO), les oxydes de soufre (SO_x), les oxydes d'azote (NO_x) et autres hydrocarbures imbrulés sont alors responsables de pluies acides, de brouillards et de diverses pollutions qui impactent non seulement la pureté de l'atmosphère mais aussi la végétation et les milieux aquatiques.



©F.Bassemayousse

⁵¹ Man diesel & Turbo, http://www.manbw.com/article_001824.html

Description économique

L'installation d'un moteur thermique sur un navire reste cependant la solution la plus économique à l'investissement, par rapport à d'autres technologies récentes sur le marché type électrique ou hybride. Cependant avec l'augmentation du prix du pétrole, le coût d'exploitation de cette technologie va devenir de plus en plus élevé.

Horizon technique

L'utilisation des carburants fossiles dans les moteurs thermiques devra être remise en question dans les années à venir, compte tenu de l'épuisement des ressources nécessaires à son fonctionnement et compte tenu de réglementations de plus en plus strictes.

Il est possible pour certains bateaux de modifier les moteurs pour qu'ils fonctionnent non plus au fioul, mais aux huiles végétales ou aux graisses animales.

De nouveaux carburants pourraient être de plus en plus utilisés, comme les essences synthétiques type Gas To Liquid ou Dyméthyl Ether (DME) (cf. partie Autres pistes de recherche).

L'utilisation de biolubrifiants pour l'entretien des moteurs est à promouvoir.

Réglementation

Aujourd'hui les armateurs doivent faire face à des normes de plus en plus strictes du point de vue de l'environnement. La réglementation varie fortement au cours du temps mais également en fonction de la zone de navigation. La plus connue des conventions est la convention MARPOL.

MARPOL

MARPOL est le nom d'une convention internationale sur la prévention de la pollution de l'environnement marin par les navires, élaborée dans le cadre de l'Organisation Maritime Internationale⁵² (OMI).

Elle est issue de la combinaison de deux traités adoptés en 1973 et 1978 et a connu de nombreux amendements.

Elle comprend aujourd'hui six annexes.

Annexe I : prévention de la pollution de la mer par les hydrocarbures.

Annexe II : prévention de la pollution de la mer par les produits chimiques en vrac.

Annexe III : prévention de la pollution de la mer par les substances dangereuses en colis.

Annexe IV : prévention de la pollution de la mer par les eaux usées.

Annexe V : prévention de la pollution de la mer par les ordures.

Annexe VI : prévention de la pollution de l'air.

Etant donné le grand nombre de réglementations existantes au niveau international, national, régional ou local, nous avons décidé de ne pas rentrer dans les détails.

Vous trouverez cependant ci-dessous un exemple de mesures prises par l'OMI concernant la réduction du taux de soufre dans le carburant des navires et illustrant la difficulté de mise en œuvre de ces réglementations.

⁵² Organisation Maritime Internationale (OMI), <http://www.imo.org/>

Démarches allant dans le sens d'une navigation durable

Exemple de mesures prises pour la réduction du taux de soufre

Suite à de nouvelles recommandations de l'Organisation Maritime Internationale (OMI)⁵³, la teneur maximale en soufre du carburant dans les aires de contrôle des émissions de soufre (Seca pour Sulfure Emissions Control Areas) passera à 1% en 2010, puis 0,1% en 2015, contre 1,5% actuellement. Pour l'instant, il n'existe que deux Seca dans le monde : la mer du Nord et la Baltique. Mais d'ici 2015, l'Union européenne, les Etats-Unis, le Japon, Singapour et l'Australie devraient être classés Seca.

Les SOx produits dans les moteurs sont essentiellement dus au soufre contenu dans le fuel et il n'y a qu'un seul moyen vraiment efficace pour baisser radicalement les SOx dans les fumées c'est de réduire le taux de soufre dans le fuel alimentant les moteurs. Un autre moyen plus aléatoire consiste à passer les fumées d'échappement des moteurs dans des scrubbers et à les laver avec de l'eau de mer. Le problème restant à régler par l'OMI sera de définir les paramètres physico-chimiques de rejet de l'effluent en mer après traitement ou son stockage à bord.

Par ailleurs en ce qui concerne l'Europe, le 1^{er} janvier 2010, la Directive européenne 2005/33/CE a fixé une teneur maximale en soufre de 0,1% en masse pour les combustibles marins utilisés par les bateaux de navigation intérieure et par les navires à quai ou au mouillage dans les ports de la communauté.

Cette limitation de la teneur en soufre du carburant des navires devrait coûter des «milliards de dollars» aux industries pétrolières et maritimes, selon Simon Bennett, secrétaire à la Chambre internationale du transport maritime de l'OMI. Par ailleurs, il n'est pas sûr que les raffineries soient en mesure de répondre à la demande de carburants mieux distillés.

Pour indication, aujourd'hui, la teneur en soufre d'un fioul lourd standard utilisé uniquement dans les moteurs des gros navires et dans les chaudières des centrales thermiques est de l'ordre de 3 à 5%.

Autres exemple de procédés permettant la réduction des émissions gazeuses

Pour faire face à ces réglementations de plus en strictes les acteurs du milieu maritime réfléchissent à de nouvelles solutions permettant de réduire l'impact environnemental des moteurs thermiques.

Aujourd'hui, il existe certains moyens techniques pour réduire ces émissions, en particulier si nous nous plaçons dans le secteur de la pêche ou de la marine marchande. En voici quelques exemples⁵⁴ :

L'injection à rampe commune (commun rail)

Ce système est une version moderne du moteur diesel à injection directe. Nous obtenons, grâce à l'injection à rampe commune, une combustion optimale du carburant, ce qui améliore le rendement du moteur, diminue sa consommation et les rejets de fumées. Ce système équipe déjà un certain nombre de moteurs diesel destinés à la marine marchande (Man, Cat, MAK, Wartsila, etc.), et est en phase d'être adapté sur tous les navires neufs. Par exemple les moteurs type « RT Flex » (sans arbre à cames) du constructeur Wärtsilä permettent de réduire la consommation spécifique et les flux gazeux nocifs rejetés dans l'atmosphère.

⁵³ International Maritime Organization, Marine Environment Protection Committee (MEPC), http://www.imo.org/Newsroom/mainframe.asp?topic_id=109

⁵⁴ Yves Guignot, professeur de l'enseignement maritime, Ecole de la Marine Marchande de Nantes

Réduction de la vitesse

La mesure la plus évidente et la plus « facile à mettre en œuvre », est la réduction de la vitesse des navires. Les grands porte-conteneurs sont les premiers concernés : passer de 25 nœuds à 20 nœuds, c'est diminuer de moitié la puissance propulsive nécessaire, avec bien sûr, un allongement de la durée de la traversée qui peut s'avérer contraignant pour respecter les délais impartis par les chargeurs ou par certaines marchandises périssables⁵⁵.

Cependant, les navires sont optimisés dès leur conception pour une vitesse donnée. La diminuer conduit à abaisser le rendement propulsif de la coque et de l'hélice, mais c'est surtout le moteur principal qui peut causer des soucis. Certains motoristes ont alors recours à des kits de vannes de sectionnement sur les collecteurs d'échappement.

Certaines compagnies décident de limiter une fois pour toutes la vitesse du navire. Ainsi « Maersk » a commandé en 2008 une série de 13 porte-conteneurs de 4 500 EVP chez « Hyundai », qui se caractérisent par une vitesse de « seulement » 22 nœuds, soit une réduction de vitesse de 2 à 3 nœuds. Il devient alors possible de spécifier un moteur moins puissant, tournant un peu plus vite mais également plus économe en carburant.

Selon une étude de la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) sur la pêche artisanale⁵⁶, une baisse de vitesse de 0,5 nœuds entraîne une réduction de la consommation de l'ordre de 10%. Selon une étude de l'ADEME l'économie serait un peu moins importante et se situerait entre 2 et 5 %.

Alimentation en courant au port et capture des émissions à quai

Une alternative à l'utilisation des groupes électrogènes pour fournir le courant du bord à quai, est d'être alimenté par le courant du port. Cette alternative permet de ne pas être soumis à la réglementation européenne qui impose de brûler des fiouls avec 0,1% de soufre, Un certain nombre de ports européens sont déjà équipés.

La société américaine ACTI⁵⁷ propose un système simple, mais semble-t-il efficace, pour réduire les émissions à quai. Il s'agit tout simplement de couvrir la cheminée d'un énorme manchon pour capter les fumées et les diriger vers une unité de traitement à terre.



©DR

D'autres solutions techniques existent pour réduire la consommation de carburant d'un navire. Ces solutions sont abordées dans la partie « Solutions alternatives » de ce dossier.

Divers

Le projet « Greenship of the future »⁵⁸ regroupe des industriels comme Man B&W, Aalborg, Maersk, etc., dans le but de réduire les émissions de CO₂ de 30% et de NO_x et SO_x de 90%. Les techniques développées sont la récupération de chaleur sur les échappements, les scrubbers (séparateurs), les peintures antiadhésives, etc.

⁵⁵ Le Marin, dossier spécial « propulsion », juin 2009

⁵⁶ Wilson J.D.K. « Economies financières et de carburant dans la pêche artisanale », FAO document technique sur les pêches

⁵⁷ Société ACTI, capture des émissions gazeuses à quai, <http://www.advancedcleanup.com/index.php?article=2>

⁵⁸ Projet Greenship of the future, <http://www.greenship.org/>

Projets de recherche proposant une alternative au pétrole

Biocarburants

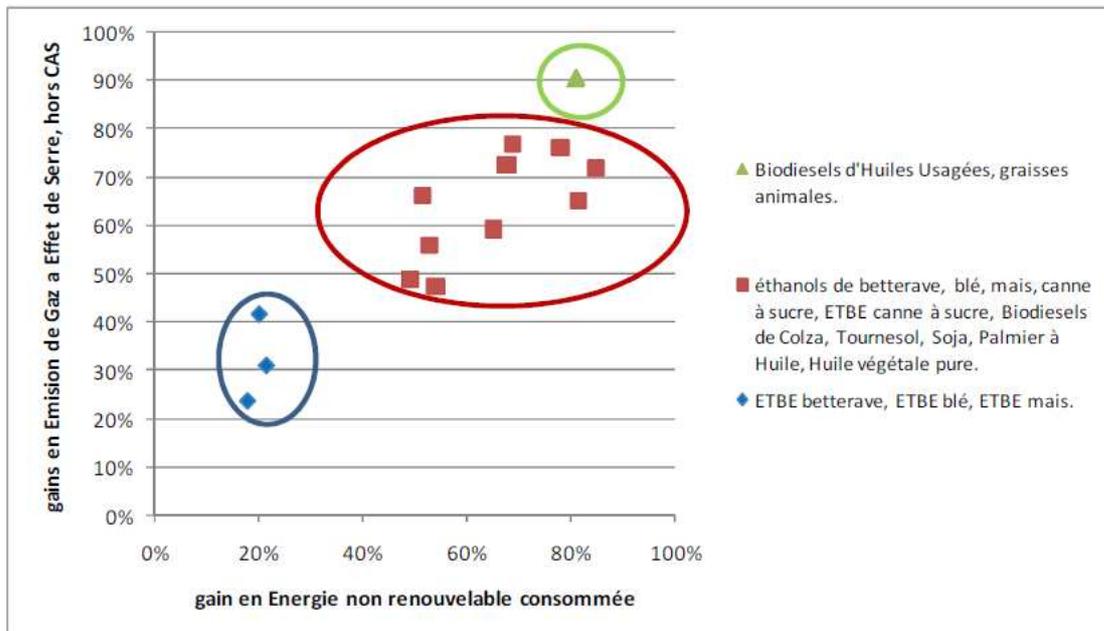
Les biocarburants, fabriqués à partir d'huiles végétales ou animales, apparaissent de plus en plus comme une solution concrète aux problèmes liés à l'utilisation d'énergies fossiles. Les avantages liés à leur utilisation sont la réduction de la pollution, le rendement moteur qui resterait inchangé, et le fait qu'elles pourraient provenir d'huiles usagées qui seraient récupérées.

Les biocarburants restent une des solutions alternatives au pétrole mais il n'est pas envisageable de produire d'une manière durable autant de biocarburants que de carburants issus du pétrole que nous consommons actuellement.

Les surfaces agricoles nécessaires à leur production installeraient une concurrence désastreuse avec les surfaces nécessaires à la production alimentaire déjà déficitaires. Des solutions existent en zones semi-désertique non cultivées à partir d'arbustes aux noix riches en huile.

Aujourd'hui de nombreux projets de recherche sont en cours pour créer des usines de biodiesel, pour effectuer des tests sur les moteurs déjà existants ou pour les adapter à l'utilisation de biocarburant.

D'après une étude de l'ADEME⁵⁹ sur l'ACV des biocarburants de 1^{ère} génération en France datant de février 2009, la comparaison des bilans énergétiques et des émissions de gaz à effet de serre issus de l'étude permet de regrouper les biocarburants en 3 catégories, représentées sur le graphique ci-dessous.



Les filières présentant les meilleurs bilans (réductions supérieures à 80 % pour la consommation d'énergie non renouvelable et à 90 % pour les émissions de GES) sont les biodiesels à partir d'huiles alimentaires usagées et de graisses animales pour la filière gazole.

Les filières avec des bilans plus mitigés (réduction inférieure à 25 % pour la consommation d'énergie non renouvelable et inférieure à 50 % pour les émissions de GES) sont les ETBE (Ethyl Tertio Butyl Ether) de blé, de maïs et de betterave.

⁵⁹ ADEME : ACV des biocarburants de 1ère génération en France, février 2009

Entre les deux, les filières avec des bilans corrects (réduction de 49 à 85 % pour la consommation d'énergie non renouvelable et de 47 à 77 % pour les émissions de GES) sont les éthanol de blé, maïs, betterave, canne à sucre, les ETBE de canne à sucre, les biodiesels de colza, de tournesol, de palme, de soja, huile végétale pure.

Exemple de projets de recherche

Le groupe finlandais Neste Oil⁶⁰ construit une usine produisant du biodiesel à partir d'huile de palme, qui sera capable de fournir 800 000 tonnes par an. Ce biodiesel, le NExBTL breveté par Neste Oil pourrait être utilisé dans tous les moteurs diesel et permettrait de réduire fortement les émissions par rapport au diesel classique, pour un surcoût de 200 à 300 \$US la tonne. D'après le motoriste Volvo, qui participe au projet NExBTL, « il pourra alimenter tous les moteurs diesel exactement comme un carburant habituel et sans conversion du moteur ».

Projet SAFEOL : Certains projets de recherche se penchent également sur la production de biocarburants à partir de micro-algues comme par exemple le projet SAFEOL61 labellisé par le Pôle Mer Bretagne et porté par SARP Industrie, filiale de Véolia Propreté.

Le projet Agrogasoil a pour ambition de fabriquer du gasoil pour la pêche à partir de déchets issus de l'activité pêche. Ce projet, porté par la société Le Floch Depollution, est également labellisé par le Pôle Mer Bretagne.

Gaz Naturel Liquéfié (GNL)

L'utilisation du gaz commence à se concrétiser en tant qu'alternative au fuel lourd. En effet, son installation ne nécessite qu'une simple adaptation des systèmes propulsifs existants, mais cela restera une propulsion Dual fuel : moteurs diesel modifiés et alimentés avec deux combustibles brûlant simultanément dans la chambre de combustion : un combustible gazeux, difficile à enflammer par allumage commandé, et un combustible liquide ayant de bonnes qualités d'auto-inflammation, appelé combustible pilote. Le rendement du moteur est comparable à celui des moteurs diesel, par contre le niveau des émissions polluantes est moindre.

Le stockage du gaz nécessite par ailleurs beaucoup de place : quatre fois plus de place qu'un stockage de fioul pour la même quantité d'énergie.⁶² L'emploi du Gaz permet d'être largement conforme aux réglementations existantes et futures les plus strictes en matière d'émissions de CO₂ (- 20%), NO_x (- 80%), SO_x (élimination totale) et de particules⁶³.

Cette alternative concerne principalement le secteur de la marine de commerce ainsi que celui de la pêche. Avant que cette alternative soit applicable à grande échelle, il est nécessaire de trouver un moyen d'approvisionner les différents ports en GNL.

Exemples d'applications

Eoseas est un projet porté par le chantier naval STX. Le bateau est un concentré de diverses technologies visant à réduire au maximum sa consommation donc son impact sur l'environnement. Il sera doté d'une propulsion au GNL, et le froid produit par la vaporisation du gaz sera notamment réutilisé dans le circuit de climatisation.

Tidekongen, ferry construit à Lorient pour un armateur norvégien, fonctionnent grâce à une propulsion mixte GNL / Diesel.

E-Max⁶⁴ de Stena Bulk, est un projet de tanker propulsé au GNL.

⁶⁰ Groupe Neste Oil, <http://www.nesteoil.com>

⁶¹ Projet SAFEOL, <http://www.pole-mer-bretagne.com/safeoil.php>

⁶² Magazine Le Marin, dossier spécial Propulsion 2009

⁶³ Magazine Le Marin, dossier spécial Propulsion 2009

⁶⁴ Projet E-Max, <http://www.stenabulk.com/E-MAXair>



Projet Eoseas, bateau doté, entre autres, d'une propulsion GNL

PROPULSION THERMIQUE		
Aspects environnementaux	Faisabilité technico-économique	Acceptabilité sociale
<p>☹️ Pollution atmosphérique non négligeable</p> <p>☹️ Combustible issu du pétrole, ressource non renouvelable</p> <p>😊 Apparition sur le marché de technologies moins consommatrices de carburants</p> <p>😊 Apparition sur le marché de nouvelles technologies permettant de réduire les émissions gazeuses</p> <p>😊 De plus en plus de projets sont en cours de développement portant sur des carburants issus de ressources animales ou végétales</p>	<p>😊 Système de propulsion le plus rentable à l'achat actuellement</p> <p>😊 La propulsion thermique permet d'obtenir des puissances très élevées</p> <p>☹️ Rendement énergétique faible</p> <p>☹️ Systèmes de traitements de pollutions coutent chers</p>	<p>☹️ L'augmentation du prix du pétrole a permis que les utilisateurs soient plus attentifs à la consommation de leur moteur.</p> <p>😊 Réglementations de plus en plus strictes poussant les motoristes à proposer des solutions moins impactantes</p>

Propulsion Electrique

Description technique

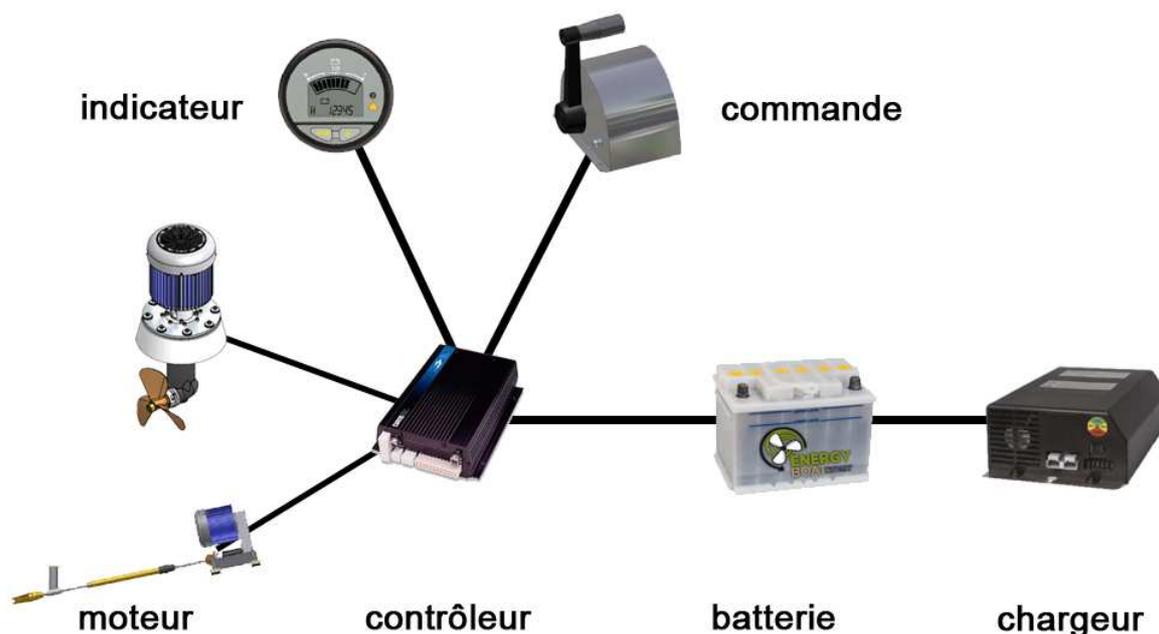
Les moteurs électriques sont de plus en plus présents sur le marché, notamment dans les secteurs de la plaisance et des services. La propulsion électrique est très intéressante d'un point de vue émission de gaz à effet de serre et de confort de navigation. Cependant elle ne permet pas, pour l'instant, d'obtenir des puissances équivalentes aux moteurs thermiques.

Les atouts environnementaux du bateau électrique (absence de rejets polluants aériens et aquatiques, absence de bruit) et ses caractéristiques techniques (quasi-absence de vibrations, très grande maniabilité et simplicité d'utilisation, coût d'exploitation réduit) font apparaître ce mode de propulsion comme une des solutions alternatives aux techniques traditionnelles.

Ce mode a bénéficié, ces dernières années, des avancées technologiques acquises dans la chaîne de propulsion électrique appliquée aux véhicules terrestres (batteries, électronique de commande, moteur...) grâce à un très important programme de recherche et de développement et à la commercialisation de près de 10 000 véhicules.

Le moteur électrique possède un rendement nettement plus supérieur à celui d'un moteur thermique (environ 85% contre 35/40%). De plus, il délivre un couple important, y compris à bas régime.

La propulsion électrique inbord est présentée sur le schéma⁶⁵ suivant :



Dans le secteur des moteurs hors bord d'appoint pour la plaisance, nous pouvons trouver des moteurs allant de 200W à 4 KW de puissance, pour un rendement proche de 45%, selon l'application que l'on souhaite (moteur de petites embarcations jusqu'au moteur de voilier).

Au niveau des navires de taille plus importante, la propulsion électrique a également sa place cependant celle-ci est pour la plupart du temps assistée d'une propulsion thermique. (cf. partie « propulsion hybride »)

⁶⁵ Kräutler, site Energy Boat, <http://www.energy-boat.fr/>

Application / Horizon technique

Les applications électriques sont aujourd'hui de plus en plus diverses.

Les constructeurs réunis au sein de l'**AFBE (Association Française pour le Bateau Electrique)**⁶⁶, dont la clientèle est essentiellement composée de collectivités territoriales, de parcs de loisirs ou de loueurs privés, peuvent compter sur l'émergence et, à terme, la montée en puissance de quatre segments de marchés du bateau électrique :

Le marché des bases de loisirs

Le marché des bases de loisirs concerne tous les loueurs de bateaux, implantées au bord des rivières, des canaux ou des plans d'eau, qui louent à l'heure ou à la demi-journée, des petites unités électriques. Aujourd'hui le marché des bases de loisirs est un marché prédominant puisqu'il assure 90% des débouchés des constructeurs, auquel il convient d'ajouter le marché des particuliers pratiquant la pêche.

Le marché des services



© Chris J Wood

Le marché des services comprend, les « bus d'eau » assurant le transport public de passagers, à l'image des navettes fluviales sur l'Erdre à Nantes (photo ci-dessus), du passeur électrique du vieux port de La Rochelle, de « l'Ecocano » exploitée à Sète, du « Ferryboat » de Marseille ou encore du bateau électrosolaire qui effectue la navette sur le lac Léman.

Le recours à l'énergie électrique pour les bateaux affectés à la servitude portuaire ou aux aires marines semble également une piste intéressante.

Le marché des promenades touristiques

Le marché des promenades touristiques comprend des bateaux d'une capacité de 50 à 100 passagers, exploités sur des plans d'eau en substitution aux unités thermiques sur les lacs ou les rivières.

Le marché du tourisme fluvial

Avec 2 000 unités en service, le marché du tourisme fluvial génère, chaque année en France, un chiffre d'affaires annuel de 850 millions de francs et autant en retombées économiques sur les régions traversées. Un marché porteur pour les bateaux de location, mais qui pour l'heure, reste fermé aux bateaux électriques, en l'absence d'embarcations adaptées aux exigences de la navigation de longue durée.

Depuis quelques années, les moteurs **hors-bords électriques** se développent également de plus en plus.

⁶⁶ Association Française pour le Bateau Electrique (AFBE), <http://www.bateau-electrique.com/>

Performances environnementales

Un moteur électrique ne produit aucune émission polluante. Le niveau sonore est également très appréciable, il est beaucoup plus faible qu'un moteur thermique. La circulation sur les lacs ou les fleuves, les aires marines protégées, les calanques etc. devenant de plus en plus difficile pour les moteurs thermiques, à cause des nouvelles réglementations, l'emploi d'un moteur électrique est un très bon moyen de concilier plaisance et respect de la nature et des autres plaisanciers. Il faut cependant faire attention au type de batterie utilisée et à leur gestion en fin de vie.

Le mode de production de l'électricité est également à prendre en compte.

Aujourd'hui il existe différentes solutions pour recharger les batteries :

- à partir d'énergies renouvelables (éolienne, panneaux solaires, hydrogénérateurs...)
- à partir du réseau électrique à quai
- à partir d'un alternateur couplé à un moteur thermique
- à partir d'un groupe électrogène
- à partir d'une pile à combustible
- etc.

Chacune de ces solutions présente des rendements énergétiques avec des consommations de combustible plus ou moins élevées, il est nécessaire de se poser la question **du rendement énergétique** total du système et donc du **véritable intérêt environnemental** à recourir à ce genre de solutions.

Pour plus de détails sur ces rendements énergétiques, se reporter à l'annexe intitulée « Etude du rendement énergétique de deux chaînes de propulsion ».

Dans cette étude, le premier cas étudié correspond à une chaîne de propulsion composée d'un moteur thermique qui entraîne directement l'arbre d'hélice. Le deuxième cas correspond à une chaîne de propulsion hybride thermique-électrique. Nous nous placerons dans le cas où l'électricité est produite à partir d'un alternateur entraîné par un moteur diesel couplé à une hélice. Cette électricité est ensuite utilisée pour la charge des batteries dont le courant va servir à alimenter un moteur électrique qui entraînera à son tour l'arbre d'hélice quand le diesel sera à l'arrêt.

Description économique

Pour l'instant, le prix d'un moteur électrique reste relativement élevé mais il est plus vite amorti car l'électricité est moins chère que les énergies fossiles.

Dans le domaine de la plaisance, dans le cas d'une propulsion 100% électrique (moteur électrique de 6Kw) le coût d'achat est d'environ 5000€ HT pour une ligne d'arbre, 7500€ HT pour un sail drive⁶⁷.

Pour définir le temps de retour sur investissement, lors de l'achat d'un moteur électrique à la place d'un moteur thermique, il est nécessaire de prendre en considération, en plus du prix d'achat, les frais d'entretien, la durée de vie de celui-ci, le coût du kilowattheure et bien sur le programme de navigation.

⁶⁷ Vidal Diffusion Marine, Energy Boat, <http://www.energy-boat.fr/>

Démarches allant dans le sens d'une navigation durable

Exemples d'applications

Plaisance

Le **Zéphir** développé par la société **Naviwatt**⁶⁸ est un petit bateau de plaisance dont le moteur électrique peut être alimenté grâce à une éolienne marine et à des cellules photovoltaïques.

Aequus 7.0⁶⁹ est un Day-boat de 7 mètres, utilisable sans permis, à vocation familiale et doté d'une propulsion électrique et de panneaux photovoltaïques.

La société **Babord**⁷⁰ fabrique de manière artisanale des petits canots bretons à motorisation électrique, destinés principalement à la navigation en eaux intérieures.

Les **bateaux de la Gamme Hydroxy**⁷¹, sont des petits bateaux développés par l'Institut d'Energie et Systèmes Electriques de Suisse occidentale. Ils sont propulsés grâce à des moteurs électriques alimentés par des piles à combustible (100W, 300W et 3000W pour le plus gros).

Navire de service

Remora⁷², conçu et fabriqué par la société E3H, est un bateau d'accompagnement et de travail, destiné en priorité aux personnels des ports de plaisance. Il est propulsé par deux moteurs de 4KW.

Bosco, conçu et fabriqué par la société E3H, est un bateau de surveillance et d'encadrement à propulsion électrique destiné aux écoles de voiles. Ce bateau a été réalisé sur la base d'un cahier des charges élaboré par Nautisme en Finistère, Nautisme en Bretagne et la Fédération Française de Voile.



Remora, cabinet E3H ; ©TLB

Exemples de fournisseurs de moteurs électriques

- **Kräutler** (<http://www.kraeutler.at/home.html>), production, commercialisation et entretien de moteurs électriques.
- **Torqueedo** (<http://www.torqueedo.com/en/hn/home.html>) : moteurs hors bord électriques pour petites et moyennes embarcations (voiliers, catamarans, ...). Leur plus gros modèle développe 4KW à 48V, ce qui équivaut à la capacité propulsive d'un moteur thermique de 9 ch., le tout en obtenant un rendement supérieur à 50%
- **Propelec** (<http://www.propelec.fr>) : moteurs hors bord, pods, torpilles électriques, destinés aux activités fluviales et portuaires.
- **Emotor** (<http://www.emotor-eco.com>) propose également une gamme de moteurs électriques hautes performances.
- **Minn Kota** (<http://www.minnkotamotors.com/home.aspx>) : constructeur de moteurs hors-bords électriques eaux douces et spécifiques à l'eau de mer.
- **Energy Boat** (<http://www.energy-boat.fr/>) : site web spécialisé dans la propulsion électrique développé par Vidal Diffusion

⁶⁸ Société Naviwatt, <http://www.naviwatt.fr/page6.php/>

⁶⁹ Aequus Boat, <http://www.aequusboats.com/>

⁷⁰ Société Babord, <http://www.babord-sarl.fr/>

⁷¹ Gamme Hydroxy, Institut d'Energie et Systèmes Electriques de Suisse occidentale, <http://iese.heig-vd.ch/hydroxy/>

⁷² Remora, <http://remora.e3h.fr/>

PROPULSION ELECTRIQUE		
Aspects environnementaux	Faisabilité technico-économique	Acceptabilité sociale
<p>😊 Pas d'émissions gazeuses</p> <p>😊 Pas de risque de pollution par les hydrocarbures</p> <p>😊 Pas de nuisance sonore</p> <p>😊 Pas de consommation de pétrole</p> <p>😞 Faire attention à l'origine de l'énergie électrique. L'impact environnemental sera différent si l'électricité est fabriquée à partir d'énergie renouvelable ou de pétrole</p> <p>😞 Nécessité de batteries pour stocker l'énergie.</p>	<p>😞 Moteur généralement moins performant en termes de puissance de propulseurs électrique actuellement dédié à la plaisance.</p> <p>😊 Les propulseurs électriques équipant les POD des bateaux passagers présentent eux des performances et des puissances intéressantes</p> <p>😞 Pas applicable aujourd'hui à toutes les activités maritimes</p> <p>😞 Possibilité d'utiliser la propulsion électrique dans le cas d'une propulsion hybride.</p> <p>😞 Cout un peu plus élevé à l'achat mais coûts d'exploitation réduits selon le programme de navigation</p> <p>😊 Quasi-absence de vibrations</p> <p>😊 Très grande maniabilité</p>	<p>😊 De plus en plus de bateaux sont équipés de propulsion électrique pour plus de confort et un coût moindre d'exploitation selon le programme de navigation</p> <p>😞 Quatre marchés émergent</p> <ul style="list-style-type: none"> - Le marché des promenades touristiques - Le marché des services - Le marché des bases de loisirs - Le marché du tourisme fluvial

Cas du moteur diesel électrique⁷³

Dans le cas d'un moteur diesel électrique, le moteur électrique est alimenté par un groupe électrogène dédié (courant alternatif).

Les moteurs diesel électriques ont pour avantages :

- autonomie (groupe électrogène)
- puissance et couple à disposition en permanence
- complément d'utilisation pour le service de bord

Par contre ceux-ci présentent également quelques inconvénients :

- installation coûteuse
- pas adapté aux petits bateaux (<12m)
- rendement énergétique plus faible si l'énergie électrique est produite à partir d'énergie fossile.

⁷³ Vidal Diffusion Marine, Energy Boat, <http://www.energy-boat.fr/>

Propulsion Hybride

Les navires à propulsion hybride sont des navires qui fonctionnent grâce à deux sources d'énergie. Les deux principaux types de propulsion hybride actuellement sur le marché sont les propulsions mixtes thermique-électrique et thermique-éolien. La propulsion hybride est une solution alternative qui permet de réduire la consommation de pétrole et donc les coûts d'exploitation (tant que la charge des batteries est réalisée à quai ou avec des énergies renouvelables) tout en gardant les avantages, lorsque cela est nécessaire, d'une propulsion thermique.

Thermique/ Electrique

Description technique

Le moteur fonctionne grâce à l'une ou l'autre des deux énergies. La propulsion est assurée soit par le moteur électrique (alimenté par le parc de batteries dédiées), soit par le moteur thermique classique. Dans ce cas, le moteur électrique se transforme en génératrice de courant.

Les avantages offerts⁷⁴ par cette technologie sont :

- Silence et confort en mode électrique sur les sites sensibles (zéro émission).
- Sécurité, recharge automatique des batteries en mode thermique, pas de contrainte ni de souci d'autonomie
- Passage instantané du mode électrique à thermique en cas de nécessité, par exemple en cas de vents et courants contraires.
- Entretien réduit et confort d'utilisation en électrique

Par contre, elle présente aussi quelques inconvénients :

- Surcoût par rapport à un moteur thermique classique
- Encombrement de l'installation et poids du parc de batteries
- Chute du rendement de l'installation électrique de propulsion quand le générateur électrique entraîné par le moteur thermique recharge les batteries.

Performances environnementales

L'impact environnemental d'une propulsion hybride « thermique / électrique » dépend du programme de navigation, de la répartition du temps d'utilisation de chaque technologie et des performances environnementales de chacune des technologies retenues (Cf. parties performance environnementale « propulsion électrique » et « propulsion thermique »).

Description économique

Les prix varient grandement d'une installation à l'autre en fonction du choix de divers éléments. Cette technologie génère un surcoût non négligeable par rapport à un moteur thermique classique ou à une propulsion 100% électrique.

Pour les bateaux destinés à la plaisance, le coût d'une installation hybride avec un moteur électrique de 6Kw est d'environ 6500€* HT⁷⁵. Attention ce coût ne comprend pas l'installation du moteur thermique.

Application / Horizon technique

Avec un moins bon rendement que le 100% diesel, plus avantageux pour les grandes traversées océaniques, ce procédé est, entre autres, intéressant pour les bateaux offshores, qui sont souvent amenés à naviguer dans des conditions très variées (transit, manœuvres etc.) ainsi que pour le remorquage, les petits transports de passagers. Ce type de propulsion fait également son apparition dans le domaine de la plaisance du fait du confort de navigation qu'offre la propulsion électrique.

⁷⁴ Nanni Diesel, <http://www.nannidiesel.com>

⁷⁵ Energy Boat, <http://www.energy-boat.fr>

Exemple de démarches allant dans le sens d'une navigation durable

- **Riverquest⁷⁶** : Bateau à propulsion hybride destiné à accueillir 150 passagers qui sert d'outil éducatif et scientifique pour une sensibilisation aux énergies renouvelables. L'électricité est stockée dans des batteries qui sont rechargées lorsque le bateau est à quai, en attendant une future installation de panneaux solaires, d'éoliennes ou de piles à combustible.



©DR

- **Le bateau de servitude « Ile Tristan »**, de 11 mètres, qui assure la navette entre le port de Douarnenez et l'île Tristan est équipé de deux moteurs thermiques Vétus de 27 ch et de deux moteurs Kräutler de 3,5 kW.

PROPULSION HYBRIDE THERMIQUE - ELECTRIQUE		
Aspects environnementaux	Faisabilité technico-économique	Acceptabilité sociale
<p>😊 Réduction de la consommation</p> <p>😊 Diminution pollution gazeuse</p> <p>😞 Solution alternative, moteur thermique toujours présent à bord</p> <p>😞 Faire attention à l'origine de l'énergie électrique. L'impact environnemental sera différent si l'électricité est fabriquée à partir d'énergie renouvelable ou du pétrole</p>	<p>😊 Nombreuses recherches à ce niveau depuis quelques années</p> <p>😞 Installations supplémentaires pas forcément contraignantes mais qui nécessitent un investissement important</p> <p>😞 Système de propulsion intéressant car il permet de garder les performances d'un moteur thermique lorsque cela est nécessaire.</p>	<p>😊 Le concept se développe dans les différents secteurs maritimes</p> <p>😞 Prix du pétrole en hausse → nécessité de trouver des alternatives</p>

Thermique / Eolien (voile d'appoint)

Description technique

La propulsion principale est assurée par des moteurs thermiques classiques, mais le navire est également équipé d'une propulsion vélique.

Que ce soit via des gréements classiques ou type cerf-volant, les applications se font de plus en plus nombreuses.

Performances environnementales

L'impact environnemental d'une propulsion hybride Thermique / Eolien dépend du programme de navigation, de la répartition du temps d'utilisation de chaque technologie et de la performance environnementale de chacune des technologies retenues (Cf. parties « propulsion vélique » et « propulsion thermique »).

⁷⁶ Riverquest, <http://www.riverquest.org/>

Description économique

L'investissement dans ce genre de système est non négligeable mais le retour sur investissement peut être relativement rapide en fonction des conditions de navigation.

Concernant les voiles d'appoint type kite, le constructeur Skysails annonce une économie de carburant pouvant aller de 10 à 30 % en fonctionnement normal, et jusqu'à 50% dans des conditions optimales de vent⁷⁷.

Application / Horizon technique

Ce type de propulsion peut être appliqué sur tous types de navires : plaisance, pêche, marine marchande...

La voile est une des solutions qui peut efficacement participer à la réduction de la consommation de carburant et donc de la pollution. L'équipement des navires est pour l'instant au stade expérimental, mais les mentalités évoluent et ce type de projet a de l'avenir.

Exemple de démarches allant dans le sens d'une navigation durable

Le projet Grand Largue⁷⁸ a pour objectif l'implantation d'un système de voiles automatisées, en complément du moteur, sur des bateaux de pêche ou de cabotage neufs ou déjà existants. Ce projet est porté par la société Avel Vor Technologies et labellisé par le Pôle Mer Bretagne.



Projet Grand Largue ; ©DR

⁷⁷ Skysail, <http://www.skysails.info/english/>

⁷⁸ Projet Grand Largue, http://www.avel-vor.fr/Projet_Grand_Largue/index.html

Le projet HALIEU KITE consiste en l'étude de l'utilisation d'un Kite (une aile courbe à structure gonflable ou caisson d'air) comme moyen de propulsion pour les bateaux de pêche.

Le but du projet est de développer les outils de simulation d'aéroélasticité pour la modélisation d'une voile en mouvement afin de quantifier la force propulsive qu'elle génère et quantifier les gains en carburant qu'elle est capable de fournir à des bateaux de pêche.

Ce projet porté par la société K-Epsilon est labellisé par le Pôle Mer PACA et cofinancé par la Direction des pêches maritimes et de l'aquaculture.

Pour les bateaux de plus de 50m, **SKYSAILS**⁷⁹ propose un dispositif avec cerf-volant à caissons (de type parapente) commandé par un boîtier embarqué, relié par une ligne à l'avant du bateau. Un mât télescopique est déployé dans les phases de lancement/réception.

Un cerf-volant de 180 m² est à l'essai, d'autres de plusieurs milliers de m² sont prévus.

Concernant les voiles d'appoint type kite, le constructeur Skysails annonce une économie de carburant pouvant aller de 10 à 30 % en fonctionnement normal, et jusqu'à 50% dans des conditions optimales de vent.

Ces voiles d'appoint type kite peuvent être utilisées pour des allures allant du vent « arrière » jusqu'au « vent de travers » voire « bon plein ».



Projet Skysails ; © DR

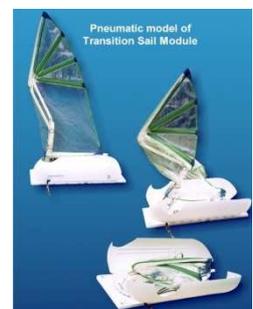
Pour les bateaux jusqu'à 20 m, **OMEGASAILS**⁸⁰ propose des cerfs-volants jusqu'à 120 m² reliés par deux lignes à une barre de commandes fixée au pont. Un boudin gonflé donne une structure au cerf-volant pour faciliter les manœuvres et assurer son équilibre en vol. C'est un cerf-volant statique qui exerce une traction et ne demande donc aucune intervention une fois en vol. Le dispositif permet de tracter des bateaux jusqu'à 20m/25t à 5 nœuds et un peu plus sans moteur par vent de 15 à 25 nœuds aux allures portantes.



Cerf-volant Omegasails ; © DR

La société Aerosea travaille également à l'élaboration de ce genre de système pour la plaisance.

- **Le projet Windship**⁸¹ propose différents systèmes pour équiper des gros navires de voiles rétractables.



Projet Windship ; ©DR

⁷⁹ Société Skysails, <http://www.skysails.info/>

⁸⁰ Société OmegaSails, <http://www.omegasails.com/>

⁸¹ Projet Windship, <http://www.transitionrig.com/windships.htm/>

PROPULSION HYBRIDE THERMIQUE - EOLIEN		
Aspects environnementaux	Faisabilité technico-économique	Acceptabilité sociale
<p>😊 Réduction de la consommation</p> <p>😊 Diminution pollution gazeuse</p> <p>😞 solution alternative, moteur thermique toujours présent à bord</p>	<p>😊 Ce type de propulsion encore peu développé aujourd'hui doit faire ses preuves à grande échelle</p> <p>😊 Nécessité de tout automatiser afin d'éviter toute charge de travail supplémentaire</p> <p>😊 Investissement relativement important mais retour sur investissement rapide selon le programme de navigation</p> <p>😞 N'est pas adapté pour toutes les allures, ces systèmes sont surtout efficaces aux allures portantes</p>	<p>😊 Le concept se développe dans les différents secteurs maritimes</p> <p>😊 Prix du pétrole en hausse → nécessité de trouver des alternatives</p>

Multi-technologies

- L'**Ecotroll**⁸² est un bateau doté d'une propulsion hybride diesel / électrique. Il possède également des éoliennes, des panneaux solaires pour la recharge des batteries ainsi qu'une voile d'appoint type kite fabriquée par Omegasails.

- Le bâtiment-concept **Ecoship**⁸³, à destination de la marine nationale, permet d'étudier toutes les technologies et innovations susceptibles de limiter l'impact des navires sur l'environnement. Il pourrait disposer notamment d'une architecture conçue pour limiter l'impact du vent sur la structure du bateau, ainsi que d'une voile d'appoint type kite.



Projet Ecoship ; © DR

Cas des moteurs « Dual fuel »

Les moteurs fonctionnent au gaz naturel, mais le fioul standard sert à l'allumage. Pour ces moteurs, il est possible de fonctionner à 100% de fioul, ou seulement au gaz une fois que le moteur est en route (cf. partie Gaz Naturel Liquifié).

La technologie dual fuel est de plus en plus présente sur le marché, que ce soit pour les groupes électrogènes couplés à des moteurs électriques ou bien pour une propulsion directe.

⁸² Projet EcoTroll, <http://web.ecotroll.net>

⁸³ Projet Ecoship, <http://www.dcnsgroup.com>

Solutions Alternatives

Hélices haut rendement, tuyères, pods

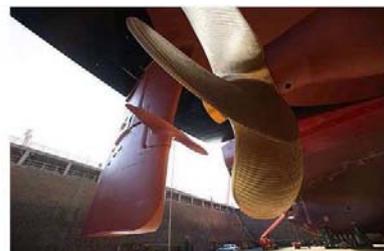
De nombreuses solutions existent pour améliorer le rendement d'un moteur et réduire les consommations de carburant. En plus des modifications apportées à l'architecture des navires (cf. chapitre « Architecture », les modifications au niveau des hélices et des systèmes propulsifs représentent un bon moyen d'atteindre cet objectif. En voici quelques exemples⁸⁴ :

Hélices en matériaux composites

Ces hélices ont la capacité de s'adapter aux charges hydrauliques qu'elles subissent du fait de leur souplesse, ce qui a pour effet d'améliorer le rendement et de limiter le phénomène de cavitation (turbulences liées à la rotation des pales).

Systèmes annulant la rotation du navire liée à la rotation des pales

Des ailerons situés dans le flux de l'hélice permettent d'annuler cette rotation, voire même de dégager une petite poussée. C'est le cas du « Thrust fin » développé par le chantier Coréen Hyundai (photo de gauche), ainsi que de la technologie Energopac développée par le constructeur Wärtsilä. Le système Energopac est un bloc totalement orientable sous forme de pod constitué d'une hélice directement montée devant un gouvernail (photo de droite).



©DR

POD (ou hélices en nacelles)

Les Pods (nacelles orientable installée sous la coque d'un navire) ont permis de faire disparaître l'arbre d'hélice, la charpente qui l'entoure et le gouvernail. Un des avantages est qu'ils permettent de retrouver l'efficacité des hélices contra-rotatives sans recourir à une mécanique lourde et compliquée. Il suffit de placer le Pod derrière une hélice conventionnelle.

Le projet Enviropax⁸⁵, développé par des chantiers finlandais et le groupe Wärtsilä étudie cette solution technique.



Projet Enviropax ; © DR

Le projet OPTIPROPULSEUR⁸⁶ vise à proposer des solutions aux armements de pêche afin d'améliorer le rendement propulsif des navires de pêche. Il s'agit de modifier les propulseurs existants, ce qui permet de faire évoluer des bateaux en cours d'exploitation.

Ce projet porté par SHIP STUDIO est réalisé en partenariat avec le comité régional des pêches maritimes et des élevages marins de Bretagne, l'AGLIA, MPI, Masson Marine, GTN, et le bassin d'essai des carènes (partenaire associé).

⁸⁴ Yves Guignot, professeur de l'enseignement maritime, Ecole de la Marine Marchande de Nantes

⁸⁵ Wärtsilä : <http://www.wartsila.com/>

⁸⁶ Projet Optipropulseur, <http://www.aglia.org/Dossier.asp?id=12>

Systèmes d'aide à la navigation, indicateurs de consommation

Certains outils de mesure de la consommation ou d'aide à la navigation se sont démontrés efficaces pour réduire la consommation de carburant sans pour autant toucher à la forme du navire ou à son système de propulsion. De plus, selon les paramètres pris en compte, ces outils peuvent être adaptés à tous les secteurs.

Les économètres

Les **économètres** indiquent uniquement la consommation instantanée. Cette indication permet de changer les comportements des marins qui fixent leur vitesse de route suivant une consommation donnée.

Les données de consommation sur une campagne de pêche pourraient fournir aussi des informations intéressantes pour évaluer de façon plus fine dans quelles plages d'utilisation les navires consomment le plus et définir de manière optimum les axes de recherche pour la conception des futurs navires.

Les systèmes d'aide à la navigation

Les systèmes d'aide à la navigation visent à optimiser les trajets des navires pour réduire au maximum le temps du trajet, pour diminuer la consommation et pour augmenter la sécurité des personnes et des marchandises. Les critères pris en considération sont de plus en plus nombreux le vent, la mer, les courants marins, la présence de glace, l'ensoleillement (exemple du projet Planet Solar, Cf. chapitre « panneaux solaires »), la présence de zones à risque ...

Exemples de démarches allant dans le sens d'une navigation durable

Dans l'objectif de mettre sur le marché un outil logiciel d'aide à la décision pour l'économie de carburant dans les campagnes de pêche, la SODENA (société spécialisée en informatique embarquée pour le secteur maritime), le CRPEMB (comité régional des pêches de Bretagne) et le LISA (laboratoire de l'université d'Angers) associent leurs compétences au sein d'un projet de valorisation scientifique. Le sujet de thèse proposé concrétise cette collaboration pour sa partie scientifique.

Le projet SODENA est un logiciel qui va acquérir les informations environnementales de la zone de pêche, c'est-à-dire la bathymétrie à travers les données cartographiques de la zone, les courants, la météo.

Le Programme Ecomer est un programme collaboratif porté par les chantiers Glehen associant 25 partenaires qui a pour objectif de fournir aux pêcheurs un outil matériel et logiciel leur permettant de mieux maîtriser leur consommation de carburant (différenciation possible des différentes sources de consommation de carburant). Le deuxième objectif de ce logiciel est de concevoir un module de formation à la conduite économique de bateaux de pêche, formation qui serait dispensée tant en formation initiale que continue, ainsi qu'à tout acheteur d'un système Ecomer. Le produit final du projet sera un « système de gestion et de contrôle de l'Énergie »

Le projet ECO-SECURITE⁸⁷ porté par l'entreprise Principia Rd⁸⁸ et labellisé par le Pôle Mer PACA, consiste à démontrer la faisabilité d'un système embarqué d'aide à la décision pour le pilotage des grands navires (porte-conteneurs, tankers, paquebots de croisière, bâtiments de surface) avec pour objectif d'augmenter la sécurité des navires, d'optimiser le maintien en conditions opérationnelles, et réduire l'impact environnemental.

Le projet EONAV mettra à la disposition des armateurs et des équipages un outil d'aide à la décision permettant de réduire les consommations d'énergie à bord des navires et leurs rejets atmosphériques. Il croisera, en temps réel, plusieurs séries de paramètres qui conditionnent les consommations et les rejets, certains liés au milieu (état de la mer, courant, houle, température, vent), d'autres aux conditions d'exploitation du navire (nombre de passagers, vitesse de transit, vitesse maximale...). Ce projet porté par DCNS est labellisé conjointement avec le Pôle Mer Bretagne et le Pôle Mer PACA.

⁸⁷ Projet Eco-Sécurité, <http://www.polemerpaca.com/fr/domaines-d-activite/naval-et-nautisme/eco-securite-299.html>

⁸⁸ Principia RD, <http://www.principia.fr>

Autres pistes de recherche

Il existe d'autres pistes qui sont exploitées concernant la propulsion des navires, comme des systèmes totalement innovants pour mouvoir un bateau, ou des anciennes technologies qui revoient le jour. En voici quelques-unes :

Le rotor Flettner

Cette technologie s'inspire de l'effet Magnus. Il s'agit d'un cylindre vertical en rotation capable de produire une poussée longitudinale lorsque le vent est sur le côté.

Cette technologie a vu le jour dans les années 20 sur deux navires allemands dont le *Buckau* mais elle n'a pas prospéré, dépassée par les navires à hélices ou à voiles classiques.

Elle a également été adaptée sur un bateau de recherche de J.Y. Cousteau dans les années 80, l'*Alcyone*, même si le système rebaptisé *Turbovoile* est un peu plus évolué.

L'E-Ship 1 est un projet porté par la société allemande Enercon (spécialisée dans les éoliennes) qui a vu le jour en 2008. Il s'agit d'un bateau à propulsion thermique exploitant l'énergie de quatre turbovoiles de 25m pour alléger sa consommation (30 à 50% d'économies selon le constructeur).



Ce bateau mis à l'eau en août 2010 pourrait bien sonner le renouveau d'une technologie dont les avantages ne sont pas négligeables si l'on vise une navigation plus propre.

Moteur à air comprimé

Certains nouveaux projets concernant la propulsion des véhicules terrestres semblent intéressants pour réduire l'impact de la propulsion des véhicules. Il est possible que ces projets soient à terme applicables au secteur maritime.

Le projet de collaboration entre Tata Motors et Guy Negre (société MDI)⁸⁹ créateur d'un moteur à air comprimé, ouvre des perspectives intéressantes. Le moteur à air comprimé est un moteur propre utilisant de l'air comprimé comme carburant.

⁸⁹ <http://www.mdi.lu/>

Propulsion grâce à la force des vagues

Le **SUNTORY MERMAID 2**⁹⁰ est un navire propulsé essentiellement par la force des vagues. Il est capable d'atteindre une vitesse de 5 nœuds grâce à des panneaux mobiles sous la coque à l'avant qui oscillent avec le mouvement de la houle, ce qui par ailleurs rend ce catamaran plus stable qu'un autre type de bateau.



Projet Suntory Mermaid ; ©DR

Il a ainsi pu rallier le Japon en partant des îles d'Hawaï en 3 mois et demi. Des panneaux solaires permettaient d'alimenter les équipements de bord, une voile et un moteur thermique de secours étaient également présents en cas d'urgence. Il est à noter que la coque a été construite en aluminium de seconde fusion à partir du recyclage de canettes en aluminium.

PROPULSION

Il n'y a pas de solution unique mais un ensemble de solutions qui dépendent de l'utilisation que nous souhaitons pour notre bateau.

Depuis de nombreuses années la plupart des projets de R&D étaient orientés autour du pétrole mais récemment des solutions alternatives avec un potentiel intéressant font leur apparition.

EcoNav souhaite privilégier et faire la promotion des systèmes de propulsion utilisant des énergies non fossiles. Cependant cela n'est pas toujours envisageable en fonction de l'utilisation du bateau et des conditions de navigation.

Lorsque cela sera possible, la propulsion à la voile pure où grâce à des auxiliaires véliques sera privilégiée. Une attention particulière devra néanmoins être portée sur les matériaux et l'origine du gréement.

Le cas échéant la propulsion électrique et la propulsion hybride seront également privilégiées à la propulsion thermique cependant il faut porter attention aux sources d'énergies nécessaires pour la recharge des batteries. Les sources d'énergies renouvelables sont à promouvoir.

⁹⁰ Suntory Mermaid 2, <http://www1.suntory-mermaid2.com>

Energie du bord

Aujourd'hui, une bonne gestion de l'énergie du bord est devenue essentielle pour naviguer dans de bonnes conditions.

Nous observons depuis quelques années une augmentation du nombre d'équipements électriques et électroniques à bord des bateaux. Ces équipements sont installés avec l'objectif d'une meilleure navigation, d'un meilleur confort ou d'une sécurité accrue.

Pour palier à cette augmentation de la consommation du bord, il est nécessaire de trouver des équipements plus économes en énergie mais également des systèmes adaptés pour la production et le stockage de cette énergie.

Production d'énergie à bord

Aujourd'hui il est possible de produire de l'énergie électrique à bord des bateaux à partir d'énergie renouvelable. Le solaire, le vent, la vitesse du bateau, les courants voir même les déchets organiques (Cf. partie gestion des déchets) sont des sources d'énergie qui permettent une production d'électricité non négligeable.

Aujourd'hui, les éoliennes, les panneaux solaires et les hydrogénérateurs sont des équipements que nous trouvons de plus en plus dans le milieu maritime. A plus long terme, les piles à combustibles peuvent être une alternative intéressante.

Panneaux solaires

Description technique

Au même titre que l'éolienne, le panneau solaire est un bon moyen de maintenir la charge des batteries sur un bateau. L'évolution technique permanente dans ce domaine permet aujourd'hui d'utiliser aussi bien des panneaux rigides que des matériaux souples qui résistent aux intempéries, au piétinement, tout en ayant un rendement énergétique maximum. C'est pourquoi il est bien adapté au milieu marin.

Sur le marché, il existe des modules photovoltaïques adaptés à tous types de besoins. Les plus petits peuvent être pliables et servent de chargeur de portable, ou de petits appareils électroniques, et cela va jusqu'aux panneaux solaires haut rendements rigides. Nous pouvons alors obtenir des puissances allant de 6W à 130W pour les plus grands modèles destinés à la plaisance.

En fonction de l'usage et de la puissance souhaitée, il faudra calculer la surface des panneaux solaires nécessaires. Il est possible de monter le panneau photovoltaïque sur des supports orientables, et ainsi de rentabiliser au maximum l'énergie solaire. Cela permet de réaliser une augmentation de la production d'énergie de 30% par rapport à un panneau fixe.



Planet Solar ; © DR

Application / Horizon technique

Le panneau solaire est une très bonne solution technique pour recharger les batteries nécessaires à l'énergie du bord. Dans certains cas exceptionnels, les panneaux solaires peuvent produire suffisamment d'énergie pour propulser le bateau.

Il y a 15 ans le rendement des panneaux solaires était de 6 -7 %, aujourd'hui, il s'élève à 12-13% voir 20% pour les plus performants. Certains panneaux, actuellement en étude, pourraient atteindre les 60% de rendement.

Son utilisation propre et silencieuse est un atout non négligeable pour son développement dans le monde maritime. Le fait que l'on puisse placer des panneaux solaires, sur chaque espace à découvert et inoccupé, est aussi un grand avantage, qui développera à terme leur utilisation dans d'autres domaines que la plaisance ou les navires de service.

Contrairement à l'éolienne et à l'hydrogénérateur qui sont plutôt destinés à des navires de petite taille, les panneaux solaires peuvent être utilisés sur tout type de navires.

Des projets de voiles équipés de panneaux solaires semblent être des pistes de recherche intéressante.

Performances environnementales

Un panneau solaire est essentiellement composé de matériaux recyclables (verre et aluminium). Le recyclage est donc possible pour une grande partie du panneau photovoltaïque.

Cependant, celui-ci reste délicat, surtout lors de la récupération du silicium, ainsi que du plomb et du cadmium, présents en faible quantité dans les panneaux.

Les panneaux solaires, peuvent être utilisés jusqu'à 15 à 30 ans selon les modèles.

En juillet 2007, l'association PV Cycle⁹¹ a été créée afin d'améliorer les procédés de fabrication, de les rendre moins énergivores et de limiter les déchets. Les membres de l'association, qui représentent environ 85% du marché photovoltaïque européen se sont entendus pour lancer en 2010 la reprise et le recyclage gratuits des modules photovoltaïques en fin de vie. L'objectif, à l'horizon 2015, est de collecter 90 % de déchets et d'en recycler un minimum de 80 %.

Description économique

Les prix sont très variables en fonction des dimensions, des applications et des matériaux que l'on souhaite. On trouve des petits panneaux solaires pliables destinés à la recharge de petits appareils à partir de 100 euros, et cela peut monter jusqu'à 1300 euros pour les panneaux solaires flexibles haut rendement (pour une même puissance fournie par le système, les flexibles sont plus chers à l'achat que leurs équivalents rigides). Il est également important de prévoir le coût d'un régulateur pour éviter une surcharge des batteries.

Pour une utilisation quotidienne, le temps de retour sur investissement est estimé de 1 à 4 ans selon les matériaux utilisés et les conditions d'ensoleillement⁹². Il est donc important de tenir compte du nombre d'heures passées à bord du navire par jour pour être sûr que cette installation soit rentable d'un point de vue économique et environnemental.

Exemple de démarches allant dans le sens d'une navigation durable

- **Le Ferry Boat de Marseille** est un navire de transport de passagers pouvant transporter 45 personnes. Il est doté d'une propulsion constituée de deux moteurs électriques triphasés de 380V à haut rendement qui fonctionnent grâce aux 25 m² de cellules photovoltaïques. Celles-ci peuvent développer jusqu'à 3000W en été.

- **La Péniche Soleil d'Oc**⁹³, est complètement autonome grâce à l'énergie électro-solaire développée par 80m² de panneaux solaires. 6m² de récepteurs thermiques permettent, par ailleurs, de chauffer l'eau nécessaire pour la vie à bord.

- **Le projet PLANETSOLAR**⁹⁴ : projet visant à effectuer un tour du monde avec un bateau électrique n'utilisant que des panneaux solaires pour produire de l'énergie. Cette énergie sera utilisée non seulement pour la vie à bord, mais également pour la propulsion du catamaran. Ce bateau, mis à l'eau en début d'année, a pour objectif de démontrer la fiabilité de cette énergie renouvelable.

Le 18 novembre 2010 PlanetSolar a réussi la première étape de son tour du monde en parcourant près de 5000 km entre les Canaries et Saint-Martin en 26 jours et 19 heures, battant ainsi de plus de deux jours le record de traversée de l'Atlantique par un bateau solaire.

⁹¹ PV Cycle, <http://www.pvcycle.org/>

⁹² Bilan énergétique d'un panneau solaire, <http://www.outilssolaires.com/pv/prin-bilan.htm>

⁹³ Soleil d'Oc, www.naviratous2.com/

⁹⁴ Planet Solar, <http://www.planetsolar.org/>

- **Le Photon V**, est un canoë solaire, inventé par Christian de Gélis. C'est une embarcation longue de cinq mètres, construit en aluminium, qui ne pèse que 30 kg, et ayant la particularité d'avancer sans ramer. Ce canoë est équipé d'un ensemble de quatre panneaux solaires photovoltaïques, qui alimente un moto-propulseur électrique immergé et totalement silencieux, qui permet d'atteindre une vitesse réglementaire de 6 km/heure sur les canaux. Une batterie relais lui permet de fonctionner en absence momentanée du soleil.

Solar Odyssey⁹⁵ est un trimaran électro-solaire dont l'objectif est de faire le tour du monde à l'énergie solaire. Pour sa propulsion Solar Odyssey utilise de l'énergie électrique produite à partir d'environ 110 m² de cellules photovoltaïques au silicium dopé monocristallin, encapsulées sur panneaux composites.

Pour réaliser le premier prototype, dans un souci écologique et de recyclage, des éléments provenant de deux programmes très ambitieux, l'un sportif et l'autre technologique ont été récupérés. Les flotteurs proviennent de la première version de l'Hydroptère et la coque centrale d'une expérimentation sur le trimaran Foncia de 60 pieds d'Alain Gautier.



Solar Odyssey ; © Jacques Vapillon

L'association **Concept Hélios Propulsion**⁹⁶ basée dans la région de Rouen en Normandie a pour objectif le développement, la promotion et la pratique au sens le plus large de tous engins navigant utilisant l'énergie solaire. L'association possède actuellement deux bateaux solaires dont : Photon-agile : Un catamaran de 8 mètres de James Wharam, immatriculé à Rouen et Eolios: le trimaran qui a traversé la Manche lors du 4^{ème} défi.

PANNEAUX SOLAIRES		
Aspects environnementaux	Faisabilité technico-économique	Acceptabilité sociale
<ul style="list-style-type: none"> ☺ Silencieux ☺ Production d'énergie régulière ☺ Efficace en navigation et au mouillage ☹ Coût de fabrication élevé mais retour sur investissement énergétique rapide ☹ Gestion en fin de vie difficile mais recyclage des matériaux en augmentation 	<ul style="list-style-type: none"> ☺ Prix abordable ☺ Taille et production d'énergie adaptable ☺ Panneaux de plus en plus résistants au choc ☺ Rendement en progression régulière 	<ul style="list-style-type: none"> ☺ Les panneaux solaires à terre comme en mer sont de plus en plus communs.

⁹⁵ Solar Odyssey, <http://www.solar-odyssey.com/fr/>

⁹⁶ Concept Hélios Propulsion, <http://www.bateauxsolaires.org/index.html>

Eolienne

Description technique

Une éolienne transforme l'énergie mécanique en énergie électrique sous l'effet de la force du vent. La mise en rotation des pales fait tourner une génératrice électrique. La puissance délivrée par une éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent.

Les puissances des éoliennes marines que l'on trouve sur le marché vont de 200 à 500 Watts (dans des conditions optimales) soit plusieurs dizaines d'ampères c'est à dire l'équivalent d'un chargeur de quai⁹⁷. Par exemple la consommation d'un réfrigérateur sur un bateau de 11 mètres est de 45 Watts et celle d'un PC actif de 30 Watts.

Quel que soit le mois de l'année, l'éolienne apporte une énergie significative (25Ah par jour au minimum en moyenne pour le mois de juin). La production est naturellement supérieure pendant les mois d'hiver lorsqu'il y a davantage de vent.



Application / Horizon technique

Dans le domaine de la plaisance, l'éolienne marine est un très bon moyen de recharger les batteries nécessaires à l'énergie du bord.

Il existe également des éoliennes à axe vertical⁹⁸, qui auraient des avantages comparés aux éoliennes dites classiques. Des tests sont actuellement en cours, par la **Fondation Ocean Vital**, afin de pouvoir adapter ces éoliennes au milieu maritime.

Description économique

La gamme des modèles est comprise entre 400 et 1900 euros, le prix varie en fonction de la puissance fournie (sans compter les éventuels kits de fixation, les options tel un régulateur de tension pour éviter toute surcharge des batteries, etc.).

EOLIENNE		
Aspects environnementaux	Faisabilité technico-économique	Acceptabilité sociale
<p>☺ Production d'énergie importante surtout en saison hivernale</p> <p>☹ Production d'énergie en « dents de scie »</p> <p>☺ Fonctionnent au mouillage et en navigation</p>	<p>☺ Prix abordable, large choix d'éoliennes présent sur le marché</p> <p>☺ Les pales de certaines éoliennes peuvent être encombrantes et sont source de vibrations sonores</p> <p>☺ De nouvelles générations d'éoliennes, à l'étude, amélioreront encore les performances</p>	<p>☺ L'installation d'éoliennes à terre comme en mer est en plein développement</p>

⁹⁷ Seatronic, http://www.seatronic.fr/energie-douce-eolienne-c-39_41.html

⁹⁸ Fondation Ocean Vital, <http://www.fondationoceanvital.com/>

Hydrogénérateur

Description technique

L'hydrogénérateur utilise l'énergie créée par le déplacement d'un bateau pour générer de l'électricité à son bord. Il existe plusieurs modèles disponibles sur le marché avec des performances très différentes : en fonction des modèles, la plage d'utilisation en vitesse varie entre 3 et 12 nœuds. En dessous de 3 nœuds le dispositif ne délivre rien ou très peu, et au-dessus de 12 nœuds l'hélice décroche sur certains modèles. Dans certains cas, il est possible d'adapter l'hélice à la vitesse du bateau.

D'après le site Seatronic⁹⁹, les hydrogénérateurs jusqu'alors disponibles sur le marché peuvent produire 5AH à 5 nœuds soit 60W, ce qui constitue un apport d'énergie intéressant. Le principal inconvénient est la légère perte de vitesse que ce type d'équipement peut occasionner.

Hydrogénérateurs Watt&Sea

Une nouvelle génération d'hydrogénérateurs proposant des performances supérieures vient d'arriver sur le marché. Yannick Bestaven et son équipe¹⁰⁰ sont à l'origine de ces produits, développés et mis au point au départ pour la course au large avec un cahier des charges simples : développer un rendement maximal pour une trainée imperceptible. Adopté par les coureurs de haut niveau en course au large et face à la forte demande des particuliers, la version Racing a donné naissance à la version Cruising, qui bénéficie de ses composants de haute technologie.

Ces hydrogénérateurs produisent 125W à partir de 5 nœuds. A cette vitesse l'hydrogénérateur permet d'assurer l'autonomie énergétique complète de certains bateaux. A partir de 8 nœuds le système fonctionne à pleine puissance (500W). Lorsque la vitesse augmente : l'hélice ne décroche pas et l'hydrogénérateur continue à produire cette puissance. Il est également possible de recharger les batteries, donc de naviguer en énergie positive.



Hydrogénérateur Watt&Sea ; © DR

Application / Horizon technique

L'hydrogénérateur peut donc être un moyen très efficace de subvenir à l'énergie nécessaire pour la vie à bord et le fonctionnement général du bateau. Son silence d'utilisation, ses bonnes performances techniques et les excellents rendements proposés par certains modèles, sont autant de facteurs qui participent à l'intérêt croissant et à l'expansion de ce produit dans le milieu maritime.

Description économique

Il est possible de se procurer des hydrogénérateurs à partir de 1000 euros. Concernant les hydrogénérateurs haut rendement pour la plaisance, il faut compter 5000 à 6000 euros, et jusqu'à 15000 euros pour les modèles destinés aux navires de compétition¹⁰¹.

Certaines marques proposent des combinés générateurs éoliens et hydrogénérateurs.

HYDROGENERATEUR		
Aspects environnementaux	Faisabilité technico-économique	Acceptabilité sociale
<p>😊 Apport d'énergie intéressant</p> <p>😞 Apport d'énergie variable en fonction de la vitesse du bateau et de son allure</p> <p>😞 Certains hydrogénérateurs peuvent ralentir légèrement le bateau</p>	<p>😊 Prix abordable</p> <p>😞 Efficace seulement en navigation</p>	<p>😊 Les hydrogénérateurs sont de plus en plus appréciés par les coureurs au large pour la production d'énergie du bord</p>

⁹⁹ Seatronic, http://www.seatronic.fr/energie-douce-eolienne-c-39_41.html

¹⁰⁰ Watt&Sea, <http://www.wattandsea.com/>

¹⁰¹ Watteo, http://www.watteo.fr/index-n-Hydro_g_n_rateurs-cp-354_468.html

Bilan comparatif production d'énergie verte à bord

Tableau comparatif production d'énergies vertes à bord

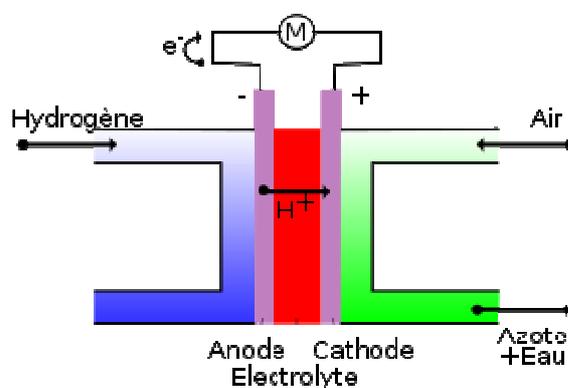
	Hydrogénérateur	Eolienne	Panneaux Solaires
Avantages	Silence d'utilisation Bonnes performances techniques Bons rendements	Efficace au mouillage et en navigation Très efficace en saison hivernale	Efficace au mouillage et en navigation Silencieux Possibilité de mise en place de plusieurs panneaux
Inconvénients	Inopérant au mouillage Pas adaptable sur tout types de navires	Souvent taxée de nuisances sonores Perte d'efficacité au portant Production en dents-de-scie	Gestion en fin de vie difficile mais recyclage des matériaux en augmentation
Domaine d'application	Plutôt plaisance et course au large	Plutôt plaisance, course au large et petit bateaux de pêche	Adaptable sur tous types de navires
Prix	A partir de 1000 euros	Entre 400 et 1900	de 100 euros (pour 1 petit panneau) à 1300 euros (pour 1 panneau flexible haut rendement)
Watts	60 à 500 Watts Dépend de la vitesse du bateau	200 à 500 Watts Dépend de la vitesse du vent	6 à 130 Watts Dépend de l'ensoleillement

Pile à combustible

Description technique

La pile à combustible est une mini-centrale produisant de l'électricité à partir d'un combustible s'oxydant sur une électrode. Ce combustible peut être du méthanol ou de l'hydrogène (produit à partir d'unités transformant le méthanol ou directement l'eau).

Voici un schéma de fonctionnement de la pile à combustible.



Caractéristiques de la pile à combustible :

- Deux électrodes en contact avec un électrolyte.
- L'une des électrodes est alimentée en hydrogène et l'autre en oxygène.
- L'oxydation de l'hydrogène produit des électrons qui sont collectés à l'anode
- A la cathode, des électrons sont au contraire prélevés pour la réduction du comburant

Le dihydrogène est le combustible idéal des piles à combustible car à ce jour il reste le moyen le plus efficace pour convertir l'énergie chimique en énergie électrique. La réversibilité entre l'électricité et le dihydrogène est possible, ce qui constitue un avantage : l'hydrogène et l'électricité sont deux vecteurs complémentaires, notamment avec les électrolyseurs et les piles à combustible.

L'hydrogène est également la molécule la plus énergétique : 120 MJ/Kg, soit 2,2 fois le gaz naturel, ce qui constitue un avantage non négligeable.

Le dihydrogène est une matière de base pour les industries chimiques. La consommation mondiale actuelle s'élève à 4,5 millions de tonnes. Le dihydrogène représente 1,5 % des consommations mondiales d'énergie. Mais il est fort probable que son utilisation augmente dans les années à venir car il représente un grand potentiel¹⁰².

La production du dihydrogène¹⁰³

Bien qu'il ne se trouve pas à l'état naturel, on peut facilement produire le dihydrogène, avec des modes de production très variés. (Électrolyseur, thermochimie, oxydation...)

Aujourd'hui, la quasi-totalité de la production industrielle de dihydrogène se fait par un procédé de craquage d'hydrocarbures appelé aussi vaporeformage.

L'une des solutions les plus étudiées de nos jours est **l'électrolyse**. Elle consiste à dissocier l'oxygène et l'hydrogène de l'eau sous l'action d'un courant électrique dans une cuve pleine d'eau. On obtient donc du dihydrogène à la cathode et du dioxygène à l'anode.

Cette solution comporte de nombreux avantages : elle permet de produire du dihydrogène très pur, très facilement et avec de très bons rendements (de l'ordre de 70 à 80%).

Ensuite l'électrolyse permet de produire de l'hydrogène sans aucune émission de gaz à effet de serre et en ne consommant que de l'eau et de l'énergie électrique.

Le stockage du dihydrogène

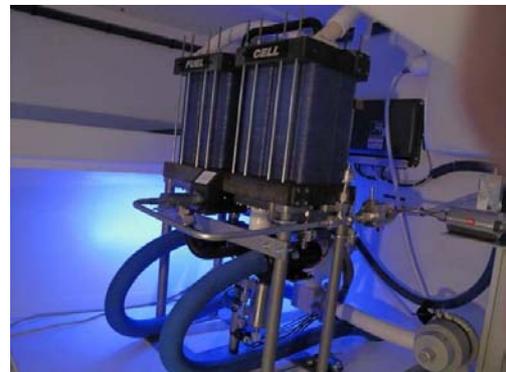
Le dihydrogène présente de multiples modes de stockage. Les stockages sous forme comprimée et liquéfiée sont actuellement les plus utilisés, mais ils sont loin de satisfaire par leurs performances. C'est pourquoi, d'autres solutions existent : borohydrure de sodium (NaBH₄), hydrures métalliques, charbon actif, nanofibres et nanotubes de carbone.

Domaine d'application

Aujourd'hui, une pile à combustible peut permettre la charge des batteries, ou bien de subvenir aux besoins énergétiques d'un bateau de plaisance ou d'un bateau de service par exemple. Elle permet également la propulsion d'une petite embarcation à moteur électrique.

Cette technologie n'est néanmoins pas encore adaptée pour la production d'énergie des gros bateaux type porte conteneurs ou méthaniers, notamment à cause d'un manque de puissance.

Les piles à combustible disponibles pour le marché de la plaisance sont capables de dispenser jusqu'à 2200 W/h pendant quelques heures pour recharger des batteries, et leur rendement varie de 40 à 70% en fonction du type de pile¹⁰⁴.



Projet zéro CO₂ ; © DR

¹⁰²Association française de l'hydrogène ; <http://www.afh2.org/fr/index.php/>

¹⁰³Quelle place pour l'hydrogène dans les systèmes énergétiques?, DUFOIX Mathieu & Co. Mars 2004

Performances environnementales

Le dihydrogène est un carburant propre car il n'est ni polluant, ni toxique. Sa combustion peut tout de même parfois conduire à produire une faible quantité de NOx du fait de la réaction de l'azote de l'air avec une partie du dioxygène (O₂). D'autre part, il n'y a aucune formation de dérivés carbonés ou soufrés.

Il est cependant important de se poser des questions concernant l'énergie nécessaire à la production du dihydrogène et aux rendements énergétiques finaux de cette technologie. En effet, aujourd'hui la production d'hydrogène nécessite principalement des énergies fossiles. Un développement de sa production à partir d'énergie renouvelable est souhaitable.

Horizon technique

La pile à combustible semble promise à un bel avenir, surtout pour recharger les batteries à tout moment sans forcément passer par un chargeur à quai. Pour le moment, il est très difficile de trouver des points de distribution lorsque la pile fonctionne directement à partir d'un stock d'hydrogène. Aujourd'hui les puissances obtenues ne permettent pas d'envisager ce genre d'équipements sur tous types de navires, même si de nombreuses recherches sont en cours.

Afin de favoriser le développement pour l'hydrogène comme source d'énergie il est également nécessaire que la réglementation évolue dans ce sens.

Description économique

Deux types de piles à combustible sont pour l'instant commercialisés pour les bateaux de plaisance : une fonctionnant grâce à des recharges de méthanol¹⁰⁵, l'autre fonctionnant à l'hydrogène¹⁰⁶, fabriqué par une unité de production qui transforme l'eau pure en hydrogène par électrolyse. Les prix varient en fonction de la puissance délivrée, entre 2000 et 5300 euros pour une pile à combustible fonctionnant au méthanol (les recharges de méthanol sont disponibles pour environ 50 euros les 10L). En utilisation normale, une pile de ce type consomme pour 3 euros de combustible par jour.

Le dihydrogène reste assez cher mais, hors taxe, son prix correspond à celui de l'essence.

Exemples de démarches allant dans le sens d'une navigation durable

Le projet zéro CO₂¹⁰⁷ est un projet qui vise à faire le tour de la Méditerranée à bord d'un voilier équipé d'un moteur électrique alimenté par une pile à combustible fonctionnant à l'hydrogène.

Le H2 Nemo est un bateau, équipé d'une pile à combustible, lancé sur les canaux d'Amsterdam en décembre 2009, pouvant transporter jusqu'à 87 passagers. C'est un bateau unique qui fonctionne avec un moteur électrique alimenté par une pile à combustible et de l'hydrogène. Il ne produit pas de monoxyde de carbone. Ce projet de 3 millions d'euros est financé, en partie, par le gouvernement néerlandais. Les touristes peuvent désormais prendre un « Zéro CO2 Canal Cruise », en payant un supplément de 50 centimes.



Projet zéro CO₂ ; © DR

¹⁰⁴ Acta energy, <http://www.actaenergy.it/>

¹⁰⁵ Piles à combustible EFOY, <http://www.efoy.com/fr/>

¹⁰⁶ Piles à combustible et unité de production d'hydrogène Acta Energy, <http://www.actaenergy.it/>

¹⁰⁷ Projet Zéro CO₂, <http://zeroco2sailing.com/>

Le projet européen « Methapu¹⁰⁸ » a pour objectif d'installer une pile à combustible alimentée au méthanol comme groupe sur un navire roulier pour tester la validité du système. Le Groupe Wartsila est le fournisseur des piles. La première pile testée présente une puissance de 20 kW, le but étant de monter à 250 kW en fin de test.

Le projet « FellowSHIP¹⁰⁹ » étudie l'application d'une pile de type MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) de 320 kW (fabriquée par MTU) sur un navire (Viking Lady) en guise de groupe électrogène.

Le projet Casapac¹¹⁰, consiste en la réalisation d'un navire prototype de moins de 12 m destiné à la pêche (de type polyvalent caseyeur/fileyeur) dont la spécificité sera la motorisation électrochimique par pile à combustible alimentée en hydrogène/air. Ce projet est porté par la société **Alca Torda Applications**.

HELION est un industriel majeur de la filière hydrogène énergie. Son activité porte sur le développement et la commercialisation de solutions pour la production d'hydrogène par électrolyse, et la production d'énergie électrique et thermique à base de pile à combustible. Helion porte notamment le **projet APACHE** (Applications à Pile A Combustible Hybride Embarquées) à destination des yachts et des voiliers. Ce projet est labellisé par le Pôle Mer PACA.

Autres acteurs

- **Association française de l'hydrogène** (<http://www.afh2.org>)

L'Association Française de l'Hydrogène créée en 1998, a pour objet la promotion des technologies relatives à l'hydrogène, de sa production à son utilisation.

- **L'entreprise allemande EFOY** (<http://www.efoy.com/fr/>) fabrique des piles à combustible et leurs recharges de méthanol destinées à un usage nomade. Elles sont tout autant adaptées à une utilisation en camping car qu'à la charge des batteries d'un bateau de plaisance.

- **Acta Energy** (<http://www.actaenergy.it>), est une entreprise italienne qui fabrique des piles à combustible et leurs unités de production d'hydrogène. Ces dernières nécessitent seulement une alimentation en eau pour fournir de l'hydrogène.

- **Watteo** (<http://www.watteo.fr>) commercialise les deux modèles de piles à combustible.

Pistes de recherche

Nouvelle technique de production d'hydrogène à partir des microalgues¹¹¹

Capable de produire de l'électricité sans émettre de CO₂ ou d'autres substances polluantes, l'hydrogène se présente comme une source d'énergie prometteuse. C'est pourquoi la production d'hydrogène respectueuse de l'environnement et en quantité suffisante est un thème de recherche qui occupe de nombreux scientifiques. L'algue microscopique *Chlamydomonas reinhardtii* est susceptible, dans certaines conditions de stress, de synthétiser cette précieuse ressource. Des biologistes de l'Université de la Ruhr à Bochum sont parvenus à isoler des composants de cette algue responsables de la production d'hydrogène et à transposer in vitro cette réaction. Les chercheurs de Bochum ont, de plus, réussi à expliquer de manière détaillée la réaction productrice d'hydrogène, ce qui permettra vraisemblablement, à terme, d'accroître son rendement. Les résultats de l'étude ont été publiés dans la revue "Journal of Biological Chemistry".

¹⁰⁸ Projet Methapu, <http://www.methapu.com/>

¹⁰⁹ Projet FellowShip, <http://vikinglady.no/>

¹¹⁰ Projet Casapac, <http://www.alcatorda.free.fr/produits.html>

¹¹¹ Production d'hydrogène à partir de microalgues, <http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/61954.htm>

PILE A COMBUSTIBLE		
Aspects environnementaux	Faisabilité technico-économique	Acceptabilité sociale
<p>😊 Bon moyen de produire de l'énergie sans pour autant embarquer de combustible fossile</p> <p>😞 L'hydrogène est un carburant propre cependant il faut porter attention à l'impact de sa production</p>	<p>😊 Les quelques initiatives existantes ont présentés des résultats plutôt positifs</p> <p>😞 Nécessite un important espace de stockage</p> <p>😞 Peu de points de distribution de l'Hydrogène</p> <p>😞 Installations supplémentaires pas forcément contraignantes mais nécessite un investissement important</p>	<p>😊 Nombreuses recherches à ce niveau depuis quelques années</p> <p>😞 Il est nécessaire que la réglementation évolue pour faciliter l'implantation de PAC sur les bateaux</p> <p>😞 Quelques craintes concernant le stockage d'hydrogène</p>

PRODUCTION D'ENERGIE

Les équipements permettant au bateau d'être autonome d'un point du vue énergétique sont à promouvoir. L'offre de choix est relativement importante et le prix acceptable.

Aujourd'hui nous trouvons sur le marché trois types d'équipements techniquement et économiquement viables : éolienne, hydrogénérateur, panneaux solaires.

Les piles à combustible présentent des caractéristiques intéressantes et seront amenées à se développer dans les années à venir.

Il est important de tenir compte du programme de navigation afin de s'assurer que l'achat de ce type d'équipement soit rentable d'un point de vue économique et environnemental.

Le choix de l'équipement devra se faire en fonction du type, du lieu et de la période de navigation.

Enfin n'oublions pas que l'énergie la plus séduisante sur le plan écologique est celle que nous n'aurons pas consommée. Il est donc nécessaire de réduire sa consommation à la source.

Réduction consommation d'énergie

Avant de commencer à réfléchir à quelle énergie renouvelable nous pouvons utiliser pour compenser notre consommation énergétique, il est important de se poser la question « comment pouvons-nous réduire notre consommation d'énergie ? ».

LED

Aujourd'hui, les diodes électroluminescentes, abrégées généralement sous les sigles **DEL** ou **LED** (de l'anglais *light-emitting diode*), sont utilisées en tant qu'ampoules d'éclairage ou feux de routes.

Les avantages des LED sont les suivants :

- réduction de la consommation : jusqu'à une consommation divisée par 10
- augmentation de la durée de vie : 50 000 heures soit une durée de vie de 6 ans si la LED est continuellement allumée.

Pour émettre de la lumière, une ampoule LED utilise le passage d'un courant électrique dans un cristal, c'est le phénomène d'électroluminescence (luminescence provoquée par l'excitation d'un courant électrique).

La luminescence est la propriété qu'ont certaines substances d'émettre de la lumière (dite « froide ») à basse température sous l'effet d'une excitation. Les LED ne provoquent donc aucun dégagement de température.

Aujourd'hui l'éclairage LED a fait ses preuves dans de nombreuses applications : projecteur de pont à LED, éclairage de cockpit, projecteur de barre de flèche à LED, éclairage de voiles à LED, feux de route.



© Mantagua

L'entreprise **Breizelec**¹¹² conçoit et fabrique des éclairages à LED pour divers secteurs d'activités sous la marque Mantagua. Breizelec développe intégralement l'électronique, l'optique, la mécanique et la plasturgie de leurs ampoules et éclairages en choisissant les meilleurs fournisseurs de composants du moment. Breizelec vise à obtenir le meilleur rapport qualité/performance pour un prix acceptable et se refuse de jouer la carte de l'importation de produits asiatiques.

L'entreprise **EOLED**¹¹³, implanté dans le secteur des Nouvelles Énergies, propose son conseil et son expertise aux entreprises et aux particuliers, afin de leur assurer une consommation d'énergie responsable, ce qui implique la réduction de leur consommation et la production d'énergie propre.

EOLED met à disposition une gamme de lampes et luminaires LED de qualité qui viennent se substituer aux anciennes technologies incandescente, halogène, fluorescente, fluo compacte...

Parmi les autres principaux producteurs de LED nous pouvons citer : Mantagua-BREIZELEC, Ledconcept, Navylux, Lunatronic, , Optolamp, Hellamarine, Lopolight.

LED		
Aspects environnementaux	Faisabilité technico-économique	Acceptabilité sociale
<p>😊 Réduction significative de la consommation</p> <p>😊 Durée de vie plus élevée qu'une ampoule classique</p>	<p>☹️ Certaines LED manquent de puissance selon leur utilisation</p> <p>☹️ Prix relativement élevé à l'achat</p> <p>😊 Retour sur investissement relativement rapide en fonction du programme de navigation</p> <p>😊 Mise en place possible sur tous types de navires</p>	<p>😊 De plus en plus d'ampoule LED sont présentes sur le marché</p>

¹¹² Breizelec, <http://www.mantagua.fr/>

¹¹³ EOLED, <http://www.eoled.fr/>

Choisir des appareils électriques et électroniques économes en énergie

Un appareil électroménager récent consomme beaucoup moins d'électricité qu'un modèle ancien. Mais des équipements de même génération peuvent être plus ou moins gourmands. Comment différencier les économes des dépensiers ?

L'**étiquette énergie**, apparue en 1994 à l'initiative de la Commission européenne, renseigne sur les consommations des différents modèles : elle est devenue un outil indispensable pour bien choisir un équipement électroménager.

Elle est **obligatoire** pour les réfrigérateurs, congélateurs, combinés, lave-linge, sèche-linge, lave-linge séchant et lave-vaisselle mais aussi pour les lampes, les fours électriques et les climatiseurs.

Les équipements de classe A sont plus chers à l'achat que les autres. Leur surcoût est généralement amorti par les économies qu'ils permettent de réaliser. Il existe maintenant des appareils classés A+ (lave-linge, réfrigérateurs et congélateurs) et même A++ (réfrigérateurs et congélateurs), dont les performances sont encore meilleures.

APPAREILS ELECTRIQUES ET ELECTRONIQUES ECONOMES EN ENERGIE		
Aspects environnementaux	Faisabilité technico-économique	Acceptabilité sociale
 Réduction significative de la consommation	 Prix relativement élevé à l'achat mais retour sur investissement assez rapide selon le programme de navigation  Mise en place possible sur tous types de navires	 Réglementation de plus en plus strictes à ce niveau. Cette réglementation a notamment permis d'enlever du marché les appareils les plus polluants

Les appareils électriques autonomes en énergie

Exemple : Produits Tacktick¹¹⁴

Les **écrans Tacktick** sont sans fil et utilisent une technologie solaire « micro-énergie » ce qui signifie qu'ils sont très légers et fiables.

Les écrans Tacktick sont alimentés par énergie solaire. Des batteries au lithium intégrées sont suffisantes pour la durée de vie de l'appareil. La consommation d'énergie est très faible et permet aux unités de fonctionner jusqu'à 300 heures sans être rechargées.

Cependant ces appareils ont un coût relativement élevés et l'offre de choix est plutôt faible.

APPAREILS ELECTRIQUES AUTONOMES EN ENERGIE		
Aspects environnementaux	Faisabilité technico-économique	Acceptabilité sociale
 Réduction significative de la consommation	 Investissement relativement élevé  Offre présente sur le marché plutôt faible	

¹¹⁴ Tacktick, électronique marine, <http://www.tacktick.fr/default.aspx>

Autres exemples : secteur de la pêche

Optimisation des trains de pêche

Le projet EFFICALUT¹¹⁵ a pour objectif d'améliorer l'efficacité énergétique des trains de pêche des chalutiers, porté par la Coopérative Maritime Etaploise, en partenariat notamment avec l'IFREMER et le CRPMEMB (comité régional des pêches de Bretagne).

Le projet EFFICALUT a pour objectif de développer un logiciel de simulation des chaluts en mer qui conduira à réduire la traînée de l'engin, et, par conséquent, la consommation de carburant. EFFICALUT constitue la phase expérimentale du projet HYDROPECHE, projet de recherche, financé lors du 1^{er} appel à projets de la Direction des Pêches Maritimes et de l'Aquaculture (DPMA) en 2008.

Réduction de la consommation d'énergie pour la production de froid

Le projet MERITA¹¹⁶, porté par l'entreprise Lesterglas, a comme objectif principal de démontrer qu'une réduction importante de la consommation d'énergie pour la production de froid dans les navires est possible, grâce à un réfrigérateur thermoacoustique utilisant des rejets thermiques. Au niveau technique, il s'agira de valider le facteur d'échelle à franchir pour atteindre des puissances élevées. Au niveau scientifique, il s'agira d'adapter les outils de dimensionnement, de développer un générateur d'ondes acoustiques spécialisé pour recevoir l'énergie des rejets thermiques et son couplage avec le système de réfrigération thermoacoustique.

Au niveau industriel, il s'agira de valider la faisabilité à coût économique des composants du système et poser les bases de la création d'une filière de fabrication de systèmes « froids » dans la région Ouest. Ce projet est labellisé par le Pôle Mer Bretagne.



Le P'tit mousse ; ©EcoNav

¹¹⁵ Projet Effichalut, <http://www.pole-mer-bretagne.com/effichalut.php>

¹¹⁶ Projet MERITA, <http://www.pole-mer-bretagne.com/merita.php>

Calcul du bilan énergétique

Un bilan d'énergie sert à la fois à dimensionner le parc de batterie et à déterminer quels sont les producteurs d'énergie à mettre en place pour répondre à la consommation d'électricité quotidienne. C'est une étape nécessaire pour mettre en place une installation adaptée aux besoins.

Pour réaliser un bilan énergétique¹¹⁷, il faut commencer par réaliser l'inventaire du matériel électrique utilisé en relevant pour chacun la puissance nécessaire à son fonctionnement (ces valeurs sont généralement indiquées sur les appareils et sont exprimées soit en Ampère soit en Watt).

Ensuite l'énergie consommée est déduite en estimant la durée d'utilisation de chacun des appareils sur une période de 24 heures. Afin de prendre en compte le cas le plus critique, ce bilan sera réalisé pendant une période de navigation où l'énergie consommée est la plus importante.

Pour démontrer l'importance sur notre consommation de l'utilisation d'appareils basse consommation deux cas ont été étudiés par la société Seatronic:

Cas d'étude :

1. Un cas typique d'un voilier de 11 mètres où l'installation n'a pas été conçue pour réduire la consommation électrique.
2. Dans le deuxième bilan, l'installation a été optimisée pour réduire la consommation, en utilisant des lampes et un PC adaptés et en isolant de façon plus satisfaisante le réfrigérateur.

Pour ces deux cas d'étude, nous faisons l'hypothèse d'un circuit électrique en courant continu de 12 Volts.

Bilan de l'étude :

On remarque que:

1. L'éclairage intérieur représente 12% de la consommation
2. L'éclairage extérieur représente lui aussi 12% de la consommation
3. Le poste confort représente 26% de la consommation en particulier à cause du réfrigérateur.
4. Le poste électronique représente 50% de la consommation, les deux gros consommateurs étant le pilote et le PC.

La consommation totale est de 200 Ah sur une période de 24h.

Explication sur le bilan optimisé :

Les optimisations suivantes ont été faites:

1. Eclairage intérieur: Passage à des lampes fluocompactes ce qui réduit l'énergie consommée de 20Ah.
2. L'éclairage extérieur: Passage à une lampe à LED en tête de mât (réduction de 19Ah)
3. Confort: Meilleure isolation du réfrigérateur (réduction de l'énergie consommée de 22Ah)
4. Poste électronique: Utilisation d'un PC basse consommation et meilleur paramétrage du mode veille (réduction de 28Ah).

La consommation totale est maintenant de 110 Ah sur une période de 24h et a presque été divisée par deux.

Cet exemple montre à quel point, il est important d'optimiser la consommation électrique en mettant des équipements adaptés (lampes, PC, ..). Ceci est valable pour toutes les installations autonomes et constitue la première étape d'optimisation de l'installation électrique. Le surcoût occasionné par la mise en place de ces équipements basse consommation sera largement compensé par le fait que l'on n'aura pas besoin de surdimensionner l'installation électrique.

Le détail de ce bilan énergétique ainsi qu'un fichier au format Excel pour vous permettre de réaliser le bilan d'énergie de votre bateau de plaisance sont disponibles sur le site internet de Seatronic à l'adresse suivante : <http://www.seatronic.fr/conseil/bilan-energie.php> .

¹¹⁷ Seatronic, <http://www.seatronic.fr/conseil/bilan-energie.php>

Batteries

Dans le cadre d'un projet de dimensionnement des batteries, il est important de bien définir la capacité de stockage nécessaire afin de choisir le type de batterie le plus adapté à notre usage. Dans le cadre d'un projet il est nécessaire de ne pas exclure une technologie par rapport à une autre même si à première vue certains types de batterie présentent plus d'avantages que d'autres.

Avant de commencer le dimensionnement nous devons nous poser certaines questions concernant notre futur mode de navigation afin d'établir un cahier des charges le plus précis possible.

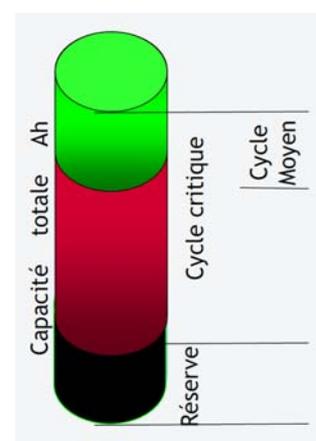
Il est important de préciser que sur un bateau nous pouvons trouver différents parcs de batteries. Généralement, il y a un ou plusieurs parcs batteries « moteur » et un ou plusieurs parcs batteries « énergie du bord ».

Détermination du besoin de capacité

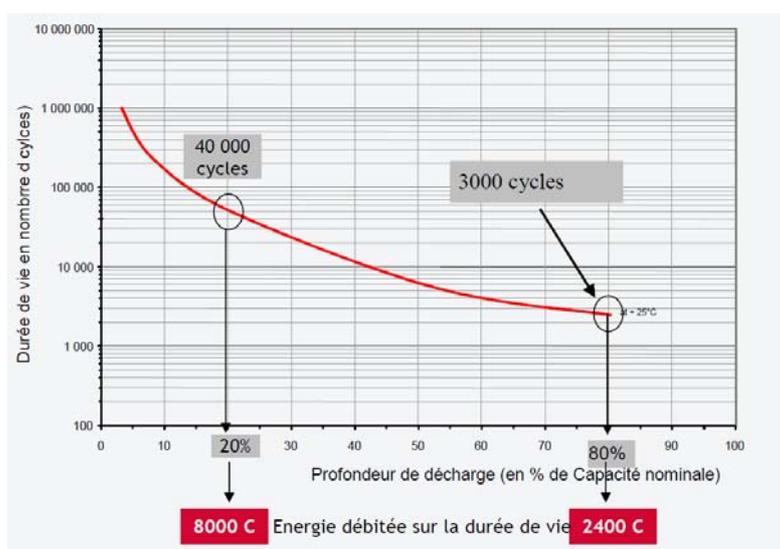
Pour dimensionner au mieux un parc batterie il est important de connaître ou d'estimer le plus précisément possible le :

- Cycle moyen quotidien (consommation kWh par trajet, nombre de trajets avant une recharge)
- Cycle critique (Parcours exceptionnellement rallongés, nombre de trajets maximum sans recharge)

Il est également essentiel de savoir si des recharges intermédiaires sont possibles.



Exemple de durée de vie en cycle en fonction de la profondeur de décharge par cycle¹¹⁸



Il faut connaître les cycles de consommation, estimer les coûts totaux de possession, et bien distinguer les différentes technologies de batterie (traditionnelle ou lithium).

¹¹⁸ Plus d'information : Frédéric Ridou, société SAFT ou marine@safbatteries.com ; www.safbatteries.com

Pour chaque projet, il y a donc un optimum technico-économique à trouver pour le dimensionnement de la batterie.

Le coût total de possession intègre tous les coûts d'investissement et d'exploitation sur toute la durée de vie du matériel, et sur le bateau entier, car l'intégration des batteries permet parfois des allègements de la structure du bateau.

Aujourd'hui nous pouvons mesurer l'efficacité relative des différents types de batterie grâce aux critères suivants :

- Energies et puissances spécifiques
- Durée de vie calendaires et en cyclage, en fonction de différentes températures
- Courant maximum en décharge (ponctuel ou continu)
- Tenue au stockage (=phases d'arrêts)
- Plages de température de fonctionnement
- Durée de recharge minimum (partielle ou pleine)
- Coût au kWh restitué sur la durée de vie

La technologie nickel-cadmium et les batteries au plomb ont toujours un rôle important à jouer dans le nautisme. Les technologies lithium sont les plus demandées aujourd'hui, mais l'analyse approfondie des projets par les intégrateurs et les concepteurs conduit souvent à retenir l'une ou l'autre des solutions.

Comparaison des différentes technologies de batteries

Six principaux types de batteries sont utilisés pour la motorisation de véhicules électriques. Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques principales de ces différentes technologies^{119;120}.

Les informations présentées sont un récapitulatif de données en provenance de sources différentes : institutionnels, fabricants, revues ou sites spécialisés. Les données indiquées par chacune des sources identifiées sont parfois disparates avec des écarts qui peuvent être importants. En conséquence, sur le nombre de cycles, le prix moyen, les comparaisons de taille et de poids, les informations sont à prendre avec précaution. En vert sont surlignés les meilleurs rendements, en rose les plus faibles.

	Plomb	Ni-Cd*	Ni-Mh*	Li-ion	Li-Polymère	Zebra
Densité énergétique (Wh/Kg)	30-50	50-80	60-120	110-160	130-200	120
Nombre de cycles (Charge/décharge)	400 à 600	800-1500	300-500	500-1000	300-500	800
Temps de charge (En heures)	6 à 12h	1h	2 à 4h	2 à 4h	2 à 4h	NC
Température de fonctionnement	-20 à +60°C	-40 à +60°C	-20 à +60°C	-20 à +60°C	0 à 60°C	270 à 350°C
Auto-décharge (%/mois)	5%	20%	30%	10%	10%	12%
Prix moyen par kWh en C	110	600	610	1200	1600	NC
Rendement énergétique (Charge/Décharge)	75%	70-90%	70%	99%	99%	NC
Comparaison de poids pour la même capacité	4	3	2	1	<1	NC
Comparaison de taille pour la même capacité	3,5	NC	1,8	1	<1	NC
Effet mémoire	Non	Oui	Peu sensible	Non	Non	Non
Recyclage	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Voltage	2	1,2	1,2	3,6	3,7	2,6

*Ni-Cd : Nickel-Cadmium / Ni-Mh : Nickel-Métalhydrure /Li-Ion : Lithium-Ion / Li-Polymère : Lithium-Polymère

¹¹⁹ CCI de Cherbourg-Cotentin / ThémaVision Veille Plaisance - Eurolarge Innovation

¹²⁰ Société SAFT ; www.safibatteries.com

Les batteries plomb

La commercialisation des batteries au plomb date de 1970, leur technologie est donc bien maîtrisée. Elles sont utilisées dans tout type de véhicule électrique.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">- Les moins chères du marché- Robuste et fiable- Recyclage du plomb	<ul style="list-style-type: none">- Contrainte de poids et de masse- Peu de cycle en décharge profonde- Faible densité énergétique

Les batteries Ni-Cd

Depuis le 1^{er} juillet 2006, la directive européenne 2002/95/CE interdit la commercialisation vers le grand public d'éléments électriques ou électroniques contenant du cadmium.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">- Temps de charge très rapide- Robuste et fiable- Longue durée de vie- Coût faible	<ul style="list-style-type: none">- Faible densité énergétique- Effet mémoire- Recyclage plus complexe en raison de la présence de Cadmium (Métal Lourd et polluant)

Les batteries Ni-Mh

Les batteries Ni-Mh équipent les véhicules hybrides type Toyota Prius, Honda Civic et Insight.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">- Coût faible- Sécurité de fonctionnement	<ul style="list-style-type: none">- Auto décharge importante

Les batteries Li-Ion

Les batteries Lithium-Ion remplacent peu à peu les technologies citées précédemment. Cette technologie est déjà très utilisée dans les batteries de petite taille (téléphones, ordinateurs...).

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">- Forte densité énergétique- Forme flexible- Moins lourde et moins volumineuse- Faible auto décharge- Grand nombre de cycles- Large gamme de température de fonctionnement- Sécurité de Fonctionnement	<ul style="list-style-type: none">- Coût important- Sensible à la surcharge- Problèmes d'auto inflammation

Les batteries Li-Po

Les batteries Lithium-Polymère équipent les prototypes Cleanova et Blue Car. Le rendement énergétique de cette technologie pourrait être plus important, aussi de nombreuses recherches sont en cours.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">- Forte densité énergétique- Légère et compacte- Résistance à la surcharge et aux fuites d'électrolytes	<ul style="list-style-type: none">- Coût important- Risque d'explosion en cas de choc- Technologie en phase d'expérimentation- mauvais fonctionnement au froid

Les batteries Zebra

Les batteries Zebra ou sodium chlorure de nickel (Na/NiCl₂) opèrent à haute température, elles équipent notamment 5 bus de l'agglomération lyonnaise. Cette technologie est particulièrement destinée aux véhicules de transport lourds.

De nouvelles technologies

Les recherches sur les batteries avancent, de nouvelles technologies voient le jour. Parmi elles nous pouvons citer les batteries « Zinc-Argent », « **Lithium-Manganèse** », « **Lithium-Vanadium** », « **Lithium-Soufre** ».

Les technologies présentent des écarts de prix sensibles, mais le plus cher à l'achat peut être le moins cher à l'usage.

Face à des utilisations contraignantes et/ou « abusives », la clé pour assurer la meilleure durée de vie du pack batterie est de garantir des conditions thermiques et électriques homogènes. Un système de gestion de batterie qui assure un suivi très précis des consommations, des comportements thermiques et des tensions est un avantage essentiel et devient absolument nécessaire quand il s'agit de batteries au lithium, car le rendement de charge de ces batteries approche les 100 % et elles n'ont donc pas de réserve en situation abusive. L'électronique de gestion des batteries permet d'éviter les surcharges individuelles des cellules les constituants. Ce n'est pas un problème de sécurité de la batterie mais surtout pour ne pas réduire la durée de vie de celle-ci. Il faut pouvoir s'assurer qu'aucune cellule ne connaîtra un état de charge différent de celui des autres cellules de la batterie. Une batterie lithium n'est donc plus un ensemble de simples cellules électrochimiques, mais un système complet.

Horizon technique

Avenir du lithium

La filière lithium, la plus prometteuse en termes de performance, est celle qui connaît la plus forte activité. Les défis à relever pour les technologies du lithium sont nombreux : disposer de batteries sûres, denses en énergie, légères et à un coût abordable ; mais aussi sécuriser les approvisionnements futurs sur le marché naissant des véhicules électriques et hybrides.

Le lithium en tant que matière première ne représente qu'une faible part du coût d'une batterie, et les réserves présentes un peu partout dans le monde devraient assurer un approvisionnement correct de la filière avec des prix modérés dans une perspective de long terme.

La concentration en Amérique du Sud des zones de production les plus intéressantes pourrait toutefois créer à moyen terme certaines tensions, notamment sur les prix. Ainsi, bien que la disponibilité du lithium ne représente pas un facteur limitant pour le développement des véhicules électriques et hybrides, certains constructeurs s'intéressent de plus en plus à l'amont de la filière batteries, tel Toyota dont une filiale a annoncé récemment sa participation à un projet d'exploitation de mines de lithium en Argentine, ou le groupe Bolloré qui s'intéresse de près aux mines de Bolivie.

Face à ces challenges, fabricants de batteries et constructeurs de véhicules électriques et hybrides adoptent des stratégies de recherche de synergies fabricants/constructeurs, ces dernières pouvant prendre la forme de prises de participation, d'alliances industrielles en vue de créer de nouveaux outils de production, ou de simples contrats de fourniture¹²¹.

¹²¹ EDF Transports et véhicules Electriques, La Lettre électronique du Réseau N° - 161 Janvier 2010

Des nouvelles générations de batteries ne cessent de voir le jour. En effet, des laboratoires et grands industriels se penchent sur la batterie de demain. Un des défis de demain, est de raccourcir le temps de charge et bien évidemment d'allonger la durée de vie de la batterie.

Sur le principe de la batterie Lithium, de nos jours la batterie de loin la plus endurante, mais aussi la plus chère, à cause de la demande en lithium supérieure à l'offre, des chercheurs ont trouvé le moyen de le combiner avec du Fer. Ce métal, beaucoup plus répandu sur terre (440 ans de réserve), remplacerait le lithium dans lequel on y injecterait des ions de lithium. Ces batteries permettraient des temps de charge jusqu'à 18 fois plus rapides... Une petite révolution dans le domaine des batteries, car cela permettrait de charger un téléphone portable en quelques secondes, et le parc de batteries d'une voiture électrique en moins de 10 min contre plusieurs heures à l'heure actuelle.

Ces batteries pourraient être commercialisées à court terme car elles utilisent les mêmes procédés industriels que les batteries lithium classiques¹²².

Exemples d'applications

ODC Marine¹²³ livre le premier bateau à passagers électrique avec piles au lithium :

Une propulsion sûre, propre et économique. C'est l'objectif d'Ecocono, mis en service mi-septembre 2009, à Sète, au sein d'Azur Croisières. Longue de 10.8 mètres pour une largeur de 4 mètres, cette vedette en aluminium, d'une capacité de 52 places, est le premier bateau à passagers au monde à être équipé de piles au lithium (fer phosphate). Très légère par rapport au plomb, la batterie lithium fer phosphate semble promise à un bel avenir. Conçue pour 3000 cycles de charges et décharges, soit 10 ans d'exploitation, elle est présentée comme sûre et fiable.

ENERGIE DU BORD

A travers ce critère nous souhaitons mettre en avant la sobriété énergétique (ampoule LED, absence d'appareils électriques ou électroniques superflus...) du bateau mais également le caractère autonome de celui-ci (présence de panneaux solaires, d'éoliennes, d'hydrogénérateur, etc.).

Il faut éviter de promouvoir l'addition non justifiée de sources d'énergies renouvelables pour compenser tout excès de consommation.

Il est également important de mesurer et de comparer, le réel impact environnemental de la fabrication d'une éolienne ou d'un panneau solaire, avec le gain énergétique généré par ce type d'équipement sur un bateau qui ne sort que quelques jours par an.

Il est donc nécessaire de trouver la meilleure adéquation possible d'un point de vue environnemental entre le programme de navigation et les équipements du bord.

¹²² Energie Boat, <http://www.energy-boat.fr/Nouvelle-generation-de-batteries.html>

¹²³ ODC Marine livre le premier bateau à passagers électrique avec pile au lithium, <http://www.meretmarine.com/article.cfm?id=111338>

Equipements pour la gestion des nuisances issues de l'exploitation des navires : déchets, eaux usées...

Selon la commission océanographique **internationale de l'UNESCO**, la pollution marine se définit par « l'introduction par l'homme de substances ou d'énergie dans l'environnement marin, qui entraînent des dommages aux ressources biologiques, des dangers pour la santé, et des entraves aux activités y compris dans le domaine des loisirs. »

Le choix du système de gestion des déchets solides ou liquides, le plus adapté à notre besoin dépend de différents facteurs : la taille du bateau, le nombre de personnes à bord, le programme de navigation, la zone de navigation... Pour plus de lisibilité, dans la suite de ce rapport, nous avons décidé d'aborder ce chapitre en classant les solutions présentées selon deux catégories. La première catégorie intitulée « navires de petite taille » correspond à des navires types plaisance ou pêche côtières. La terminologie « navire de taille plus importante » correspond à des navires type navires marchands ou des navires de pêche hauturière. Cependant cette classification n'est pas exhaustive et les termes choisis restent volontairement larges.

Gestion des eaux usées

Parmi les eaux usées identifiées à bord d'un navire, nous pouvons distinguer les eaux grises, les eaux noires, les eaux de fond de cale et les eaux de ballast (le cas échéant).

Nous différencions les eaux noires, des eaux grises par la charge en matières polluantes ; les eaux grises résultent du lavage de la vaisselle, des mains, des bains ou des douches, ainsi que du lavage de pont, tandis que les eaux noires contiennent diverses substances plus polluantes telles que matières fécales, produits cosmétiques, ou tous types de sous-produits industriels mélangés à l'eau¹²⁴.

Les fonds de cale de tous les navires recueillent des eaux résiduelles d'origines diverses, souvent mêlées d'hydrocarbures, qui doivent également être traitées



Pollution par les eaux hydrocarbonées ; ©F.Bassemayousse

¹²⁴ European Confederation of Nautical Industrie, l'impact environnemental du nautisme, une approche du cycle de vie pour une plaisance bleue, juin 2009

Les eaux noires

Origine de la pollution

Les eaux noires (ou eaux vannes) sont les eaux usées issues des sanitaires. Elles contiennent des matières fécales, souvent des germes pathogènes et des produits toxiques.¹²⁵

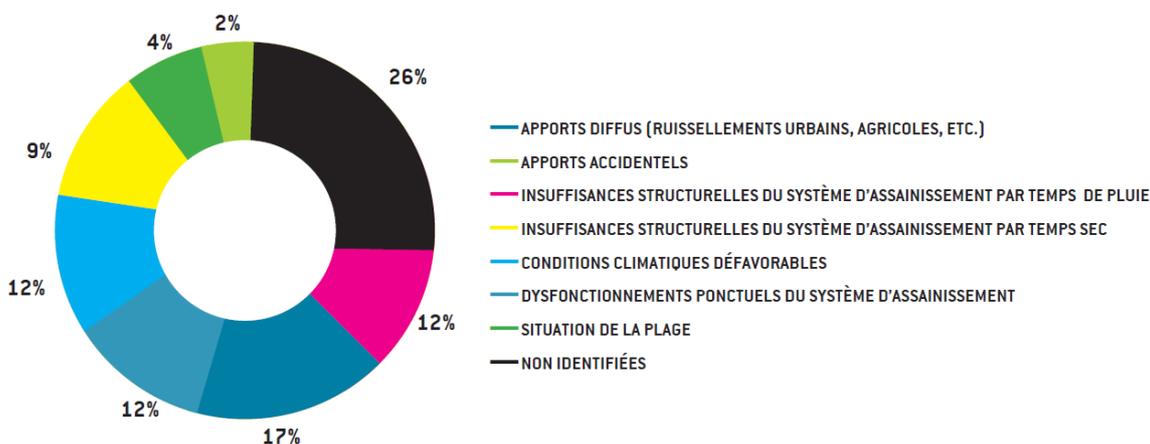
Quand de grandes quantités sont déversées localement, les eaux noires peuvent poser les problèmes environnementaux suivants:

- **Suspension de solides** et coloration de l'eau réduisant la quantité de lumière pénétrant sous la surface de l'eau, créant une pollution visuelle ;
- **Eutrophisation possible** par un apport de nutriments dans l'eau qui stimule la croissance des algues, créant un problème environnemental ;
- **Réduction possible de la quantité d'oxygène** dans l'eau qui, dans les cas où le volume d'eau est limité, peut provoquer une stagnation et le développement de bactéries anaérobiques ainsi que des gaz et odeurs incommodantes ;
- **Introduction possible de micro-organismes pathogènes** pouvant transmettre des maladies à l'homme, créant un problème sanitaire.

Dans la plupart des cas, le rejet des eaux noires ne représente qu'un problème environnemental relativement faible mais peut avoir un impact sanitaire important dans les zones sensibles.

Il est important de souligner que les principaux problèmes de dégradation de la qualité des eaux se posent dans des zones à faible renouvellement, ou en présence d'une forte concentration de bateaux.

Le rapport du Ministère français de la Santé sur l'état sanitaire des eaux de baignade¹²⁶ en mer et en eau douce montre que plus de 80% de la pollution des eaux de baignade a une cause terrestre (d'origine agricole ou système d'assainissement inadéquat). La pollution qui serait causée par les bateaux de plaisance est estimée à moins de 2% et est classée comme apport accidentel.



Ce schéma est issu du rapport de l'ECNI de juin 2009 intitulé « l'impact environnemental du nautisme, une approche du cycle de vie pour une plaisance bleue » réalisé par Rachel Moreau.

¹²⁵ BABILLOT Pascale et MARCHAND Michel. *Trafic maritime et pollution du milieu marin*. IFEN, n°44, mai 1999.

¹²⁶ Ministère de la santé, de la jeunesse et des sports : Etat sanitaire des eaux de baignade en mer et en eau douce, Bilan de la saison balnéaire 2006 (France, juillet 2007)

Navires de « petites » tailles

Réglementation

L'article **43 de la loi sur l'eau** indique que tous les bateaux de plaisance construits après le 1^{er} janvier 2008 doivent être équipés d'un système de stockage et/ou traitement des eaux noires.

Faisabilité technico économique

L'investissement pour un système de stockage varie bien évidemment en fonction de la taille de l'équipage et du temps de séjour en mer. Une étude réalisée par le magazine bateau (juin 2009) démontre qu'il faut compter environ entre 500 euros matériel et main d'œuvre compris pour un réservoir moyen de 35 ou 40 litres (il faut compter un volume de stockage de 2,5 l par jour et par personne).

Exemples de démarches allant dans le sens d'une navigation durable

Il existe des systèmes de traitement des eaux noires qui permettent de les rejeter directement en mer. **L'ELECTRO SCAN** est un système électrique qui transforme l'eau de mer en un puissant bactéricide (décomposition du sel en sodium et chlore). Les différentes étapes du traitement sont : broyage, turbulence, dégradation biochimique et rejet des eaux usées purifiées. Cependant son prix reste relativement coûteux : environ 1500 euros.



L'**entreprise Dometic**¹²⁷ commercialise des cuves à eaux noires et des toilettes portatives adaptables sur tous types de navires.

Navires de tailles « plus importantes »

Réglementation

Les navires marchands sont eux aussi soumis à la réglementation. La résolution MEPC.159(55)¹²⁸ applicable à partir du 1^{er} janvier 2010 renforce les contraintes de traitement des eaux usées définies par MARPOL 73/78.

Faisabilité technico économique

L'ensemble des systèmes de traitement des eaux noires aujourd'hui installés sur les navires en exploitation rencontrent un certain nombre de difficultés. La plupart du temps, les dispositifs de traitement sont inadaptés, mal entretenus, ou tout simplement plus assez complets ou performants pour répondre aux nouvelles contraintes réglementaires.

De plus, certains équipages ne sont pas sensibilisés et formés à la nécessité d'une gestion des eaux noires respectant l'environnement.

Exemples de démarches allant dans le sens d'une navigation durable

Les nouvelles techniques de traitement peu encombrantes comme la filtration sur membrane, la désinfection aux ultraviolets et les bioréacteurs à membranes sont de plus en plus acceptées sur le marché. En effet les services concernés sont aux prises avec des normes de qualité de plus en plus rigoureuses, des contraintes d'espace et de nouvelles exigences en matière de réglementation. Les évolutions des technologies du dessalement, du traitement de l'ozone et de l'échange ionique ouvrent les perspectives de ces technologies comme traitements de remplacement viables.

¹²⁷ Dometic, <http://www.dometic.com>

¹²⁸ International Maritime Organization, Marine Environment Protection Committee (MEPC), http://www.imo.org/Newsroom/mainframe.asp?topic_id=109

Le **projet NACRE** porté par la DCNS et labellisé par le Pôle Mer Bretagne, propose une approche environnementale globale, tant en termes de diagnostic que de réponses technologiques. Il s'agit, dans un premier temps, de mesurer l'empreinte environnementale globale de différents types de navires en activité en prenant en compte l'ensemble de leurs déchets, mais aussi leurs conditions spécifiques d'exploitation. Dans un deuxième temps, NACRE proposera des solutions techniques économiquement viables, adaptées à la configuration de l'espace et aux modes de fonctionnement des différents types de navires : encombrements réduit, consommation énergétique faible, compatibilité aux mouvements de plate-forme. Ces équipements dépasseront les normes de rejets existantes, afin de mieux anticiper l'évolution réglementaire. Testés en situation réelle sur des navires civils et militaires, ces matériels innovants seront intégrés sur des existants, et a fortiori, dans les navires en construction. D'ici à 2020, les 45 000 navires marchands qui constituent la flotte marchande au niveau mondial devront se mettre en conformité avec la réglementation¹²⁹.

GESTION DES EAUX NOIRES		
Aspects environnementaux	Faisabilité technico-économique	Acceptabilité sociale
<p>☹️ L'impact des eaux noires se fait particulièrement sentir en zones fermées ou à faible renouvellement.</p> <p>😊 Les systèmes de stockage ou de traitement se sont montrés efficaces.</p>	<p>☹️ Système de traitement efficace mais un coût économique relativement élevé.</p> <p>☹️ Système de stockage, coût moins élevé mais demande plus d'entretien</p>	<p>☹️ Nécessite beaucoup de place, propriétaires de petit navire ont du mal à l'accepter.</p>

GESTION DES EAUX NOIRES

Dans la plupart des cas, le rejet des eaux noires ne représente qu'un problème environnemental relativement faible mais peut avoir un impact sanitaire important dans les zones sensibles.
La présence de système de traitement et les taux de rejets sont aujourd'hui réglementés.

Il existe une offre techniquement efficace et abordable économiquement.
 Cependant les systèmes de rétention requièrent la mise en place, lourde et coûteuse, de stations de pompage dans les ports de plaisance.

Le problème concernera principalement les bateaux de petite taille où il est impossible d'installer un système de stockage ou de traitement et la sensibilisation de certains équipages pour qui l'environnement est loin d'être une priorité.

¹²⁹ Projet Nacre, <http://www.pole-mer-bretagne.com/nacre.php>

Les eaux grises

Origine de la pollution

Les eaux grises, provenant des produits d'entretien et de lavage, contiennent un mélange complexe de sels, graisses et tensioactifs.

Les eaux grises se distinguent par une concentration en matières organiques très variable, ainsi qu'une faible biodégradabilité. Techniquement, les eaux grises sont plus difficiles à traiter que les eaux noires car elles contiennent souvent une vaste gamme de substances chimiques et de graisses.

Il était toutefois coutumier de rejeter les eaux grises directement dans l'eau, sans aucun traitement préalable. Il en résultait une pollution évidente des eaux avoisinantes avec la présence de mousses en surface et des eaux troublées. Le recyclage de ces eaux pourrait être envisagé à bord des navires, grâce à des technologies couplant des procédés biologiques et de filtration, afin d'alimenter les cuves de lavage ou les chasses d'eau.

Le problème des eaux grises peut également être résolu en utilisant des produits d'hygiène et d'entretien biodégradables. (Cf. partie « produits d'hygiène et d'entretien »)

Exemples de démarches allant dans le sens d'une navigation durable

Dans le cadre du **projet « EOSEAS »**, navire de croisière éco-conçu, il a été envisagé par STX un système de gestion de la ressource et du traitement des eaux à bord très intéressant.

Ce système est intitulé « Water management ».

La production d'eau douce utilise des bouilleurs et osmoseurs avec systèmes de récupération d'énergie. Le système avancé de traitement des eaux traite les eaux grises et noires de façon à satisfaire les réglementations les plus contraignantes et garantir une navigation propre dans les zones sensibles. L'eau de pluie est également récupérée et les eaux de buanderie sont recyclées.

GESTION DES EAUX GRISES		
Aspects environnementaux	Faisabilité technico-économique	Acceptabilité sociale
 Impact sur l'environnement non négligeable du fait de la présence d'agents tensio-actifs dans les produits d'entretien et les détergents	 Difficile à traiter, soit stockées en même temps que les eaux noires, soit directement remises à l'eau  Agir à la source en utilisant des produits d'entretien biodégradables	

GESTION DES EAUX GRISES

La pollution engendrée par le rejet d'eaux grises en mer est non négligeable. En effet les eaux grises contiennent des agents tensio-actifs dans les produits d'entretien et de détergents. Le traitement est difficile, celles-ci peuvent cependant être stockées et traitées à terre. Aujourd'hui, la meilleure solution est de promouvoir l'usage de produits d'hygiène et d'entretien biodégradables. (cf. chapitre « produits d'hygiène et d'entretien »)

Pollution maritime par les hydrocarbures : gestion des eaux de cales

Caractéristiques générales

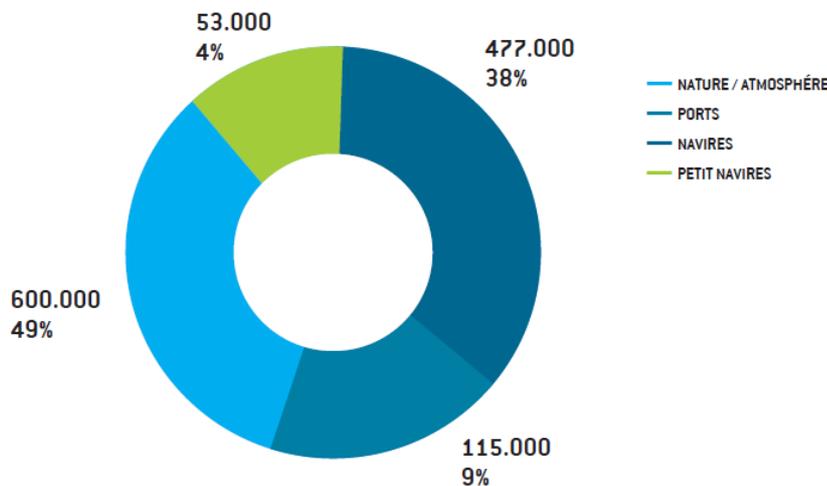
Les différentes sources de pollutions marines :

Il est important de signaler que l'ensemble des activités marines représente 26% de la pollution marine par hydrocarbures. 11% résultent de phénomènes sismiques naturels provoquant des émissions d'hydrocarbures dans l'écosystème marin et 63% de l'ensemble de la pollution marine par les hydrocarbures est due aux activités terrestres et à la pollution atmosphérique¹³⁰.

Les sources maritimes de pollution par hydrocarbures :

Le transport maritime, dont le transport d'hydrocarbures et les activités off-shore représentent 38% de la pollution par hydrocarbures.

Les petits navires sont eux responsables de 4% de cette pollution.



Ce schéma est issu du rapport de l'ECNI de juin 2009 intitulé « l'impact environnemental du nautisme, une approche du cycle de vie pour une plaisance bleue » réalisé par Rachel Moreau. Les données proviennent du Groupe d'experts sur les aspects scientifiques de la pollution marine (GESAMP) sous responsabilité du programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE/UNEP)

Les conséquences sur l'environnement dépendent du type et de la quantité de pétrole déversé, des conditions météorologiques et de la dynamique de l'écosystème touché¹³¹.

Le pétrole peut nuire à l'environnement de différentes façons :

- évaporation dans l'atmosphère et contribution à l'effet de serre et aux pluies acides
- empoisonnement après ingestion ou par contact direct
- accumulation sur la plage, infiltration de la nappe phréatique et pollution des réserves d'eau douce
- destruction des habitats naturels.

Les conséquences sont plus dramatiques sur les côtes, où le nombre d'espèces est plus important qu'en haute mer. Les mammifères marins et les oiseaux avalent de grandes quantités de mazout en tentant de se nettoyer. Les prédateurs consommant des animaux mazoutés sont aussi intoxiqués.

Les sources de pollution et les systèmes de traitement sont variables en fonction des types de navires.

¹³⁰ European Confederation of Nautical Industrie (ECNI), l'impact environnemental du nautisme, une approche du cycle de vie pour une plaisance bleue, juin 2009. Données issues du Groupe d'experts sur les aspects scientifiques de la pollution marine (GESAMP) sous responsabilité du programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE/UNEP).

¹³¹ Frédéric Castellanet, Elisa-Noémie Laurent, *Rapport sur la pollution marine par hydrocarbures et les dégazages sauvages en Méditerranée*, WWF France, Paris, Janvier 2003

Navires de « petites » tailles

Pour les bateaux de petite taille la pollution par les hydrocarbures a lieu le plus souvent au moment de l'avitaillement.

Il existe aujourd'hui des systèmes anti-débordement d'hydrocarbures. Ces systèmes ont fait leurs preuves mais restent relativement onéreux. Exemple : 250 euros pour le système EcoNab¹³².



Une solution complémentaire est d'avoir à bord des feuilles absorbantes.

Sur l'eau par temps calme ou sur le sol, les feuilles absorbantes permettent de récupérer efficacement des déversements accidentels d'hydrocarbures. **Système EcoNab**

GESTION DES EAUX HYDROCARBUREES : NAVIRES DE « PETITES » TAILLES		
Aspects environnementaux	Faisabilité technico-économique	Acceptabilité sociale
<p>☹️ La part de la pollution par les hydrocarbures imputable aux activités nautiques est très sensiblement inférieure à 2%</p> <p>☹️ Cependant des impacts importants peuvent se faire ressentir au niveau local notamment en zone fermée (lacs, canaux, ports, etc.)</p>	<p>☹️ Certains systèmes sont très efficaces mais relativement onéreux.</p> <p>😊 Certains systèmes (pompe à hydrocarbures ou feuilles absorbantes) sont moins chers et permettent tout de même de diminuer la pollution générée.</p>	<p>☹️ Bien que les navigants soient de plus en plus sensibles ils restent peu enclins à l'achat de ce type d'équipement</p>

Navires de tailles « plus importantes »

Origine de la pollution

Pour les bateaux de taille « plus importante », la pollution par les hydrocarbures a lieu généralement lors de vidange des eaux de fond de cale ou lors de la vidange des eaux de ballast.

Les eaux de fond de cale sont généralement composées d'hydrocarbures et éventuellement de graisses et de débris. Nous pouvons dire que les eaux de cale proviennent du nettoyage et de l'entretien de la machine, des cuves, de fuites et d'incidents divers. A cette eau s'ajoutent les eaux huileuses provenant des caisses à boues des séparateurs et les condensats des réfrigérants d'air.

Ces différents composants sont en suspension dans l'eau sous forme de très petites gouttelettes formant une émulsion ou de particules formant des suspensions. Il va donc falloir d'abord séparer ces composants avant de rejeter l'eau.

Les techniques proposées aujourd'hui sont basées sur la coalescence, la centrifugation, les agents chimiques, la filtration et l'absorption

En théorie, les gouttelettes d'huile vont s'agglomérer entre elles et on pourra facilement les récupérer dans un coalesceur. Les particules solides pourront être séparées par agglomération à l'aide d'un additif flocculant ou par force centrifuge. Les agents chimiques posent davantage de problèmes car ils favorisent la dispersion des émulsions en les chargeant électriquement et empêchant ainsi leur agglomération. Il faudra parfois ajouter des produits coalescents pour combattre cet effet.

¹³² Système EcoNab, <http://www.econab.com>

La pollution par les rejets d'hydrocarbures peut également être due à la vidange, en mer, des ballasts des navires. Ces ballasts, qui servent, entre autres, à équilibrer le navire, peuvent contenir du carburant lorsque ceux-ci sont utilisés comme réservoirs de secours. Ils vont ensuite être utilisés pour équilibrer le navire avec l'eau de mer. L'eau de mer sera alors chargée des restes d'hydrocarbures, si les ballasts n'ont pas été nettoyés.

Réglementation

La réglementation Marpol est stricte : si les eaux de cales contiennent peu d'hydrocarbures (moins de 15 ppm (parties par million) soit moins de 15 grammes par tonne) elles peuvent être rejetées en mer.

Plus chargées, elles doivent être traitées ou stockées : la réglementation impose un séparateur d'eau huileuse doté d'un dispositif de contrôle continu de teneur en hydrocarbures approuvé par l'Organisation Maritime Internationale (OMI).

Exemples de démarches allant dans le sens d'une navigation durable

Le projet HYCARE¹³³ porté par la société « MICRO MODULE » de Brest, vise à mettre au point un nouveau type d'équipement de mesure de la teneur en hydrocarbures des eaux de cale, homologué, plus fiable, robuste et viable économiquement. Basé sur la combinaison de différents moyens optiques innovants, le capteur HYCARE s'insèrera dans le circuit de sortie des déshuileurs installés dans tous les navires de grande taille.

Ce projet porté par la société « MICRO MODULE » de Brest, est labellisé par le Pôle Mer Bretagne.

GESTION DES EAUX HYDROCARBUREES : NAVIRES DE TAILLES « PLUS IMPORTANTES »		
Aspects environnementaux	Faisabilité technico-économique	Acceptabilité sociale
 Impact sur l'environnement notamment sur la faune et la flore marine.	 Peu de bateaux sont équipés d'un système de traitement  Le coût de pompage au port est élevé	 Beaucoup de dégazages sauvages en mer  Les réglementations et les sanctions se durcissent

EAUX HYDROCARBUREES

Les hydrocarbures ont des conséquences environnementales importantes sur la faune et la flore surtout en zone fermée.

Des systèmes de traitement existent, leur coût est variable en fonction de la taille du navire.

Nous observons toujours des rejets illicites d'hydrocarbures en mer, cependant ces derniers ont tendance à diminuer du fait d'une réglementation de plus en plus stricte et d'une prise de conscience des usagers.

La présence à bord de systèmes de traitement des eaux hydrocarbonées est donc à privilégier.

¹³³ Projet Hycare, <http://www.pole-mer-bretagne.com/hycare.php>

Eaux de ballast (cas des navires équipés de ballast)

Origine de la pollution

La vidange en mer des eaux de ballast peut entraîner deux types de pollution.

La première est le rejet en mer d'hydrocarbures (Cf. chapitre « eaux hydrocarbonées »). La deuxième est l'introduction d'espèces invasives.

L'eau de ballast pompée par les navires peut contenir des milliers d'espèces aquatiques, allant des bactéries et d'autres organismes microbiens aux micro-algues et aux espèces végétales et animales à divers stades de développement¹³⁴.

Une espèce (par exemple : plante, poisson, mammifère ou microorganisme) est qualifiée d'exotique ou de non indigène si elle n'est pas présente naturellement dans un écosystème donné. Elle est considérée envahissante si son introduction risque d'avoir des répercussions néfastes pour l'environnement, l'économie ou la santé de la population humaine. L'introduction et la propagation d'une espèce exotique envahissante est un problème important parce qu'elle comporte des répercussions écologiques, économiques, sanitaires et environnementales graves, incluant la perte de biodiversité indigène. L'ampleur de ces répercussions dépend de l'origine de l'organisme introduit et de l'emplacement du point de rejet.

Réglementation

La convention sur les eaux de ballast¹³⁵ a été conçue pour réduire (voir éliminer) les organismes vivants transportés dans ces eaux et ainsi éviter leur transfert dans des eaux étrangères.

Exemples de démarches allant dans le sens d'une navigation durable

La gestion des eaux de ballast peut nécessiter l'utilisation de procédés mécaniques, physiques, chimiques et biologiques qui employés individuellement ou collectivement, suppriment ou rendent inoffensifs les agents pathogènes et les organismes aquatiques nuisibles présents dans les eaux de ballast et empêchent leur captage ou leur rejet par les navires. L'échange, le traitement ou la rétention d'eau de ballast sont considérés comme de bonnes pratiques de gestion pour l'eau de ballast et les sédiments accumulés. La vidange dans des installations de réception est une solution qui est également à l'étude.

GESTION DES EAUX DES EAUX DE BALLAST		
Aspects environnementaux	Faisabilité technico-économique	Acceptabilité sociale
<p>☹ Risque de répercussions écologiques, sanitaires, environnementales et économiques élevées en fonction des espèces.</p> <p>☹ Conséquences très dommageables notamment dans certains grands lacs.</p>	<p>☺ Certaines solutions comme l'échange en pleine mer des eaux de ballast sont proposées.</p> <p>☹ Cependant cette solution n'est pas toujours applicable car de nombreux navires n'ont pas été conçus à l'origine pour effectuer des vidanges et remplissages de ballast en pleine mer.</p>	<p>☹ Le coût de traitement de pompage des eaux de ballast est relativement élevé certains armateurs peu scrupuleux préfèrent rejeter en pleine mer.</p> <p>☺ Prise de conscience récente</p> <p>☺ La réglementation autour de cette thématique est de plus en plus stricte</p>

EAUX DE BALLAST

L'efficacité des systèmes de traitement doit être fonction des zones de navigation du navire et donc du risque potentiel de la présence d'espèces invasives dans ses eaux de ballast.

Néanmoins la réglementation internationale se fait de plus en plus sévère et de nouveaux systèmes de traitement efficaces voient le jour.

¹³⁴ Baltic and European news, Ship recycling, air pollution and ballast water management on agenda at IMO environment meeting, briefing de presse, 5 octobre 2006, www.helcom.fi/press_office/news_baltic/en_GB/BalticAndEUnews116068/

¹³⁵ Ballast Water Convention, <http://globallast.imo.org/>

Gestion des déchets solides

Origine de la pollution

En mer, les déchets ménagers génèrent, en plus d'une pollution visuelle, un risque important pour les animaux marins. Même si ces déchets proviennent majoritairement de la terre et des navires de commerce, il est important d'avoir une gestion adaptée sur chaque type de navires.

Les déchets que nous pouvons trouver à bord des bateaux, sont les déchets ménagers mais également des produits toxiques, des déchets de bricolages, des bouts, des filets, etc.

Aujourd'hui il existe des moyens de stockage et de traitement des déchets efficaces, cependant, il a été prouvé que la meilleure solution pour réduire ses déchets était de les réduire à la source.

Quelques chiffres :

Afin de montrer l'importance d'une bonne gestion des déchets à la source nous nous sommes inspirés de deux types d'informations. La quantité moyenne de déchets générés en une journée type par un français, ainsi que la quantité de déchets générée en une journée par un membre de l'équipage de l'expédition TARA¹³⁶.

	Déchets organiques de la cuisine	Déchets papiers/cartons	Déchets verres/métaux	Autres (plastiques, aluminium, tissus...)	Totalité
TARA	0,066	0,072	0,053	0,066	0,257
A terre	0,32	0,215	0,128	0,337	1

On estime qu'en moyenne un français produit 1kg de déchet par jour¹³⁷.

Les emballages (bouteilles, cartons, boîtes de conserve, sacs...) représentent aujourd'hui 35% en volume et 25% du poids des déchets produits.

Remarque :

La quantité de déchets générée par un membre d'équipage de TARA est 4 fois moins importante que la quantité de déchets générée, en moyenne, par un français à terre. Cette différence est particulièrement importante pour les déchets d'emballages et les déchets organiques.

La meilleure solution est de réduire ses déchets à la source. La quantité de déchets d'emballage peut être réduite en évitant les produits sur-emballés et les sachets individuels. La quantité de déchets organiques peut être réduite en évaluant plus précisément la quantité de nourriture à préparer.

Cependant, même en faisant attention aux produits que nous achetons nous produisons toujours des déchets à bord du bateau. Il est donc nécessaire de trouver des solutions pour stocker et/ou traiter ces déchets. Le tri des déchets s'est démontré essentiel pour la gestion, la valorisation et donc pour la diminution de leur impact environnemental.

La quantité de déchets produits par les navires sera bien sûr proportionnelle au nombre de passagers et membres d'équipage ainsi que du nombre de jours passés en mer. La gestion de ces déchets sera donc différentes d'un bateau à un autre.

¹³⁶ Tara Arctic Damocles, Service Culture Editions Ressource pour l'Education Nationale (SCEREN), La gestion des déchets sur la base TARA ARCTIC.

¹³⁷ ADEME, Campagne nationale de caractérisation des ordures ménagères : que trouve-t-on aujourd'hui dans nos poubelles? Résultats de la campagne MODECOM 2007-2008

Réglementation

L'Annexe V de la convention MARPOL 73/78 de l'OMI¹³⁸ mentionne que dans toute zone spéciale telle que la mer Méditerranée, il est interdit de rejeter en mer tout déchet, plastique ou autres. Les déchets alimentaires et biodégradables peuvent être rejetés en mer à plus de 12 miles de la côte. Dans toutes les autres zones, il est interdit de rejeter en mer tout objet ou déchets, à moins de 12 miles de la côte, il est également interdit de rejeter tout déchet flottant à moins de 25 miles de la côte.

Chaque bateau devra donc permettre à son utilisateur de pouvoir collecter et trier les déchets à bord du navire.

Remarques : Dans le cas des rejets organiques autorisés à plus de 12 miles des côtes, si les produits du bord alimentaires ou autres sont écolabellisés, ils seront plus facilement dégradés par le milieu marin.

Navires de « petites » tailles

La façon la plus simple pour trier les déchets, est de prévoir des conteneurs différents en fonction des déchets que l'on veut trier. Cependant, sur les bateaux la place se fait chère. Pour réduire le nombre de conteneurs on peut utiliser des sacs à plusieurs compartiments.



Si le volume de déchets à stocker est important il est envisageable d'équiper le bateau d'un compacteur à déchets. Le compacteur est un appareil électroménager compact qui permet de réduire le volume des déchets secs de 80 à 85 %.

Nous produisons également d'autres types de déchets, moins communs mais toxiques comme les piles, les fusées de détresse, les produits toxiques, les tissus souillés. Ces déchets doivent également être stockés et déposés dans la déchetterie du port par exemple.

Exemples de démarches allant dans le sens d'une navigation durable

Prix Bateau bleu 2009

En 2009, à l'occasion du Salon Nautique de Paris, Allures Yachting, spécialiste du voilier aluminium, a reçu le **Prix Bateau bleu 2009** pour sa stratégie globale de gestion des déchets portant sur le tri sélectif, la réduction, le stockage et l'élimination des déchets, ainsi que sur la sensibilisation et la formation des propriétaires et utilisateurs.

Pour sa 5^e édition, le Prix Bateau bleu portait sur « la gestion des déchets à bord du bateau ». Plus de 10 projets ont été examinés par la Fédération des Industries Nautiques et le Conseil Supérieur de la Navigation de Plaisance et des Sports Nautiques.

Le bateau collecteur de Flaveo, le système Box-Bin (tri sélectif, organisation de l'espace poubelle, optimisation dynamique des volumes de stockage) de Detoutemps et le compacteur à poubelle d'Alliaura Marine ont également retenu l'attention du jury 2009.



¹³⁸ International Maritime Organization, International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 relating thereto (MARPOL), http://www.imo.org/Environment/contents.asp?doc_id=678&topic_id=258

Navires de tailles « plus importante »

Sur les bateaux de taille plus importante, un véritable plan de gestion de déchets doit être établi.

Exemples de démarches allant dans le sens d'une navigation durable

La société **Deerberg Systems**¹³⁹ est spécialisée dans la mise en place de plan de gestion des déchets, de leur collecte à leur valorisation, pour tous types de navires.

Projet EOSEAS

A bord des navires, il est fréquent de trouver des compacteurs à déchets mais également des incinérateurs. Dans le cadre du **projet « EOSEAS »**, navire de croisière éco-conçu, il a été envisagé par STX de mettre en place une station de valorisation des déchets. Ce système permettrait de produire de l'énergie à partir de la matière organique.

GESTION DES DECHETS A BORD

A bord, la place se fait rare et lorsque nous passons plusieurs jours en mer les problèmes de volume et d'odeur commencent à se poser. Aujourd'hui il existe des moyens de stockage et de traitement des déchets, efficaces, adaptés aux différents secteurs maritimes. Cependant, il a été prouvé que la meilleure solution, pour ne pas produire trop de déchets, était de les réduire à la source.

¹³⁹ Environmental Protection Systems, Deerberg-Systems, <http://www.deerberg-systems.de/>

Antifouling

Chaque année, 20 000 tonnes de peintures antisalissures marines sont utilisées pour protéger les carènes de navires et tous les équipements immergés contre les organismes qui y adhèrent. Ces produits ne sont pas sans risques pour la faune et la flore. Les réglementations européennes et internationales, concernant leur formulation, deviennent de plus en plus.



Intérêt des antifouling

Une peinture antifouling permet d'empêcher les effets nocifs du biofilm tels que :

- La surconsommation de combustible : les salissures peuvent, à elles seules, provoquer une augmentation de la consommation de carburant pouvant aller jusqu'à 40%, en raison de l'augmentation de la résistance au mouvement. Un navire propre peut naviguer plus vite en consommant moins d'énergie.

- La perte de vitesse

- La biocorrosion qui altère la coque.

- L'augmentation de la fréquence de passage en cale-sèche : le système antisalissure peut être utilisé plusieurs années, cela permet un allongement de l'intervalle entre les passages en cale sèche pour nettoyage. Le bateau sera donc également plus disponible.

- L'introduction d'espèces invasives dans les milieux naturels.

Choix de l'antifouling

Aujourd'hui il existe différents type d'antifouling. Pour une efficacité optimale il est important de réaliser le bon choix d'antifouling en fonction du type de bateau, de sa vitesse, de l'eau dans laquelle il navigue, de son port d'attache, de la fréquence de navigation...

De manière générale, les peintures antifouling sont composées de deux éléments : la matrice et le biocide. La matrice a pour fonction d'incorporer le pigment, les charges et le biocide et doit permettre le relâchement graduel de ce dernier dans l'eau. Les biocides que nous trouvons dans les antifoulings sont généralement des biocides élaborés à partir des biocides agricoles.

Selon le type de matrice utilisée, le mécanisme change la diffusion du biocide.

C'est ce processus qui caractérise les typologies différentes d'antifouling.

Antifouling matrice dure

Le liant de ce type d'antifouling est un polymère (en général de nature vinylique ou acrylique). Le biocide contenu est en quantité élevée afin de permettre un contact direct de l'eau de mer sur la surface du film, exerçant ainsi l'action antifouling.

Ces antifoulings ont une bonne résistance mécanique au film, et peuvent être appliqués en épaisseur. Ils sont particulièrement appropriés pour les bateaux rapides (30 – 35 nœuds) ou naviguant très régulièrement, mais également pour des bateaux qui stationnent dans de forts courants.

Antifouling hydrophile (matrice mixte)

L'antifouling hydrophile est un antifouling de nouvelle génération, hydrophile semi-érodable adapté aux bateaux rapides en aluminium, bois, acier ou polyester.

Excellent pouvoir antivégétatif, lui assurant ainsi une excellente glisse.

Antifouling autopolissant

Antifouling dont la matrice a une diffusion contrôlée de ses éléments¹⁴⁰.

Il absorbe l'eau qui provoque une solubilisation graduelle de la matrice. L'action chimique de l'eau, liée à l'action mécanique due au mouvement du bateau, renouvelle chacune des couches d'antifouling (action abrasive). De cette manière la diffusion des biocides est plus régulière, et assure le bon fonctionnement de l'Antifouling.

Réglementation

Le cadre juridique régissant l'utilisation des peintures antisalissures obéit à la réglementation internationale.

La convention internationale de l'Organisation maritime internationale (OMI) sur le contrôle des produits antisalissures dangereux, (convention AFS¹⁴¹) a été adoptée lors d'une conférence diplomatique de l'OMI en octobre 2001. Cette convention interdit depuis le 1^{er} janvier 2003, l'application de revêtements au TBT sur les navires et à partir du 1^{er} janvier 2008, en ce qui concerne l'élimination des revêtements contenant du TBT actif des navires.

Considérant qu'il existe aujourd'hui des produits de substitution non polluants, la convention AFS interdit l'utilisation de tous les composés organostanniques nuisibles dans les peintures antisalissures utilisées dans les navires. Aujourd'hui, cette interdiction est limitée aux composés organostanniques, mais la convention prévoit un mécanisme permettant d'éviter toute utilisation future d'autres substances nuisibles dans les systèmes antisalissures conformément au principe de précaution.

¹⁴⁰ Marine Environmental Protection Committee (MEPC). «Systèmes de peinture antisalissure, vers une solution non toxique»

¹⁴¹ International Convention on the Control of Harmful Anti-fouling Systems on Ships

Les peintures à base de TBT ont été remplacées par d'autres peintures à base de cuivre et de biocides.

Dans le cadre de la directive biocides¹⁴², l'impact environnemental de ces nouvelles substances doit être testé afin d'établir à l'échelle européenne une liste de matières actives autorisées. Des études ont été lancées et leurs résultats ne sont pas encore connus.

L'Union européenne a également mis en place le système REACH¹⁴³ pour l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques. Cette démarche sera l'occasion d'un renforcement des règles de mise sur le marché et de dispersion de toutes les formes de biocides.

Les alternatives et les pistes de recherche

Les fabricants de peinture mènent des recherches intensives pour remplacer les dérivés du cuivre par des solutions moins toxiques¹⁴⁴.

Les nouveaux biocides

Les recherches visent à créer des biocides qui aient un degré de neutralisation rapide dès leur échappement de la résine. Le biocide idéal est celui qui perd sa toxicité dans l'eau après quelques heures, mais qui reste efficace dans le film de peinture.

Un autre axe de recherche est de trouver des biocides naturels dans la nature elle-même, produits qui éviteraient l'accrochage des organismes sur les coques immergées et pourraient être inclus dans les peintures. Ces toxines naturelles pourraient donc être la prochaine étape dans l'utilisation des agents antisalissures.

Les fluoropolyuréthanes

Les peintures antisalissures actuellement commercialisées sont efficaces parce que des composants toxiques y sont inclus. L'une des voies de recherche est d'agir sur les surfaces de manière à ce que l'adhérence des salissures soit réduite. Cela peut être obtenu par l'incorporation de fluor dans les polymères.

Les silicones

Ce procédé est basé sur la technologie des élastomères au silicone qui fonctionnent grâce à l'obtention d'une surface très lisse, à faible énergie de surface et sur laquelle les organismes ont de grandes difficultés à adhérer. Ceux qui y parviennent malgré tout, sont facilement éliminés par la vitesse. Cependant ce revêtement n'a qu'une faible résistance à l'abrasion et le nettoyage doit être pratiqué avec précaution.

L'autre avantage majeur de cet antifouling est l'obtention d'une traînée moindre qu'un antifouling normal, ce qui se traduit par un gain de vitesse et une économie de carburant.

Dans le domaine de la marine marchande les silicones sont aujourd'hui régulièrement utilisés. Un peu plus cher à l'achat, il permet un retour sur investissement important.

Cependant ce type d'antifouling n'est pas conseillé pour certains bateaux en manœuvre fréquentes comme les bateaux de pêches. Les frottements réguliers, sur la coque, des engins de pêche, des orins, des défenses, etc. peuvent abimer le revêtement.

¹⁴² Directive n° 98/8/CE du 16/02/98 concernant la mise sur le marché des produits biocides

¹⁴³ Cadre réglementaire de gestion des substances chimiques (REACH), Agence européenne des produits chimiques

¹⁴⁴ TUSSEAU Gwénaëlle. *La pollution opérationnelle des navires*. Université de droit d'économie et des sciences d'Aix-Marseille, CDMT, 1997-1998

Les hydrogels

Toutes les surfaces immergées se recouvrent presque immédiatement d'un voile biologique. Les hydrogels absorbent et retiennent l'eau qui offre moins d'accrochage aux salissures. Des brevets pour des gels hydrophiles contenant entre 55 % et 98 % d'eau, ont été déposés.

Les enzymes

Théoriquement il serait possible d'utiliser des enzymes pour inhiber le processus de production de la substance adhésive de certaines salissures comme les berniques ou les algues. Cependant l'eau de mer contient un grand nombre de produits organiques et inorganiques qui peuvent bloquer la partie active de ces enzymes.

Autre technique : émission d'ondes sonores

A certaines basses fréquences, les ondes sonores ont une action certaine sur le développement des micro-organismes marins (moins de 1 % des nouvelles larves se fixent sur des supports traités aux ultrasons). Le Pôle Mer Bretagne soutient actuellement un projet qui consiste en la fabrication d'une station de lavage automatisée par ultrasons¹⁴⁵.

Une meilleure information du public

Les fabricants sont tenus d'étiqueter leurs produits conformément à la directive européenne 88/379/CEE transcrite en droit français dans l'arrêté du 21 février 1990. Il implique en particulier de donner la composition des substances dangereuses et leurs propriétés toxicologiques.

Les fabricants disposent de catalogues ou de guides d'utilisation pratiques des peintures antisalissures destinées à leur clientèle. Ils donnent de bonnes informations sur le choix des peintures en fonction du type de coque, les différents modes d'actions, les quantités à utiliser, etc. Par contre les aspects environnementaux ne sont jamais traités.

Exemples de démarches allant dans le sens d'une navigation durable

Antifouling Anti-adhérents

Hempel Hempaxil X3 :

L'Hempaxil X3¹⁴⁶ utilise une technologie à base d'hydrogel pour rendre la coque des navires «invisible» aux organismes salissants, dont les balanes et la vase biologique. Le revêtement leur apparaît comme un liquide, les empêchant ainsi de s'accrocher à la coque qui reste lisse et réduit l'effet de traînée dans l'eau.

Les essais ont prouvé que ce produit permet de réduire la consommation de carburant et les émissions de CO₂ d'un navire de 4 à 8 %. Si ces réductions étaient appliquées à chaque navire de la flotte marchande du monde, la réduction de CO₂ pourrait se chiffrer à 90 millions de tonnes par an. En outre, contrairement à un grand nombre d'autres revêtements antisalissures disponibles sur le marché, l'Hempaxil X3 est entièrement dépourvu de biocide et ne pollue donc pas l'environnement marin.

Le succès de ce revêtement a déjà attiré des compagnies de fret maritime venues de différents pays dont les Etats-Unis, la Chine, la France et le Danemark. En outre, la Marine Royale du Royaume-Uni a acheté le revêtement pour ses porte-avions. Cela pourrait contribuer à la réduction de 90 millions de tonnes de CO₂ par an, soit la quantité de CO₂ émise par la Grèce chaque année.

Grâce à ce nouveau produit, la société Hempel a remporté différents prix dont le prestigieux «Seatrade Award» pour sa contribution à la protection de l'environnement marin et atmosphérique dans le secteur des transports maritimes ainsi que « Le Product Prize » 2009 attribué par le périodique professionnel « The Engineer »

¹⁴⁵ Projet Navyclean, <http://www.polemerpaca.com/>

¹⁴⁶ Hempel, Hempaxil X3, <http://www.hempel.com>

Ecosil :

Revêtement pur silicone, Anti-adhérent et autoglissant, ECOSIL est un revêtement antisalissures de nouvelle génération, exempt de tout biocide. ECOSIL présente une surface extrêmement lisse, grasse et antiadhérente, propre aux silicones purs. De plus, ses qualités d'amélioration de glisse entraînent une économie non négligeable de carburant. (*Données producteur*)

Cependant le cout de ce produit est non négligeable et son application est plutôt complexe.

Dans la même famille, il existe également l'antifouling « Seajet »¹⁴⁷.

Revêtements en émulsion aqueuse sans solvant ni biocide

Seawax Marine Coatings¹⁴⁸ :

Seawax Marine Coatings® Sas est une éco entreprise dynamique spécialisée dans le développement de peintures marines innovantes¹⁴⁹.

Résolument engagée dans la prise en compte des problématiques environnementales, Seawax Marine Coatings® SAS poursuit un programme de recherche global basé sur les principes du développement durable : promotion de formulations en phase aqueuse sans solvants et utilisation de matières premières végétales.

Leur cœur de compétences et leur axe de développement se sont orientés vers la réalisation de produits "éco-conçus" qui intègrent dans leur composition des matières premières propres à l'environnement en conformité avec la Directive européenne N° 98/8/CE

Les formulations ont déjà fait l'objet de plusieurs dépôts de brevets.

A l'issue de deux années de R & D, leur laboratoire a élaboré des solutions alternatives respectueuses de l'environnement aquatique :

- Un revêtement antisalissure «Seawax® Fouling Release »
- Un primaire d'accrochage « Seawax® Etch Primer »

Ces deux produits sont des revêtements en émulsion aqueuse sans solvant ni biocide.

Un travail collaboratif a notamment été mené avec le Pôle Mer PACA.

L'association De Navigatio- EcoNav Bretagne expérimente ces deux produits sur un bateau en cours de rénovation : Le Noroit.

Antifouling longue durée de vie

Oceoprotec¹⁵⁰ :

L.E.O.S Products Ltd, commercialise Oceoprotec®. Un revêtement composé de cuivre noyé dans une résine époxy (20%) qui s'applique sur les carènes des navires et bateaux de plaisance à l'aide d'une machine spécialement conçue à cet effet.

Appliqué sous forme de métallisation à froid, Oceoprotec crée un film de cuivre sur toute la coque. Oceoprotec ne libère aucun biocide et est insensible à la corrosion. Son efficacité dure environ 5 ans.

La surface non rugueuse confère des propriétés de glisse améliorées de façon importante.

Le procédé Oceoprotec® diminue la fréquence des opérations de carénage, réduisant ainsi les volumes de déchets de sablage ou de résidus de peinture antifouling.

Dans le cas d'un sablage d'une carène déjà traitée Oceoprotec®, les déchets sont recyclables.

Dans la même famille des antifouling, à longue durée de vie, à base de cuivre, il existe les antifouling Coppercoat¹⁵¹ et Cuprotect¹⁵².

¹⁴⁷ Seajet, <http://www.agl-marine.com/seajet.php>

¹⁴⁸ Seawax, <http://www.seawaxmarinecoatings.com/faq.html>

¹⁴⁹ Seawax, <http://www.seawaxmarinecoatings.com/faq.html>

¹⁵⁰ Oceoprotec, <http://www.oceoprotec.com>

¹⁵¹ Coppercoat, <http://www.coppercoat.fr>

¹⁵² Cuprotect, <http://www.eco-sea.com>

Antifouling à émissions sonores

Le procédé **BoatSonic**¹⁵³ commercialisé par la société GomAir permet grâce à l'émission d'ondes à basses fréquences (50 à 60 Hertz), d'empêcher la formation des algues et concrétions.

BoatSonic se substitue à l'utilisation d'antifouling et protège le bateau en continu, en eau douce comme en eau de mer. BoatSonic agit de manière préventive en émettant des ultrasons spécifiques sur tout type de coque (sauf bois) rendant impossible l'adhésion des organismes vivants.

L'avantage environnemental de ce produit est que seules les algues et concrétions en contact avec la coque sont éliminées. Poissons, plantes et autres animaux aquatiques ne souffrent pas du tout des ondes à basse fréquences. Pour un bateau de 10 à 20 mètres le coût de ce produit s'élève à environ 2400 euros TTC.

Ce système nécessite constamment un apport d'énergie. Sur les coques anciennes, ce système pourrait provoquer la délamination de certaines couches.

Exemples de projets allant dans le sens d'une navigation durable

Projet Paint Clean¹⁵⁴ : Peinture antiallure respectueuse de l'environnement.

L'objectif de ce projet est d'arriver à une peinture 100% biodégradable en 4ans environ.

Les recherches portent actuellement sur des liants érodables non toxiques.

Le Projet Paint Clean est porté par l'entreprise Nautix réalisé en collaboration avec l'Université de Lorient, la DCNS et l'Ifremer.

Ecopaint PACA¹⁵⁵ : Revêtements non toxiques à fonctionnalités antiallures et réduction de traînée.

L'objectif de ce projet, labellisé en avril 2006, est de développer un produit novateur et efficace qui soit respectueux de l'environnement marin et qui présente une fonctionnalité réduction de traînée hydrodynamique. Cette stratégie s'appuie sur différents aspects : diminuer ou éliminer les solvants organiques par la conception de peintures aqueuses, inhiber l'adhésion et la croissance des salissures marines, favoriser la durabilité des performances des revêtements. Ce projet est porté par le laboratoire MAPIEM - USTV en collaboration avec Blancolor, la DCNS, USTV et l'Ifremer.

Biopaintrop¹⁵⁶ : peinture antifouling écologique à base de molécules marines tropicales

Complémentaire des projets PAINTCLEAN et ECOPAINT, BioPaintrop s'inscrit dans la recherche de nouvelles peintures antiallures respectueuses de l'environnement en y intégrant, cette fois, des biomolécules issues des ressources marines tropicales de l'île de La Réunion. BioPaintrop permettra de proposer, notamment aux entreprises de pêche de toute la zone intertropicale, des peintures antifouling adaptées aux milieux marins tropicaux.

Ce projet pluridisciplinaire qui associe la chimie, la physico-chimie, la biologie et l'écologie - nécessitera tout d'abord, d'identifier des molécules écologiques tropicales actives en milieu corallien.

Ce projet est colabellisé par le Pôle Qualitropic, le Pôle Mer Bretagne et le Pôle Mer PACA. Les principaux partenaires de ce projet sont : la société Nautix, IPL (Lille), BIOALGOSTRAL, l'Université de Bretagne Sud et l'Université de Toulon.

Antifouling à base de nacre : projet Pearling

Depuis un peu plus d'un an, la société vendéenne SIMAB développe dans son laboratoire un nouvel antifouling à base de nacre nommé Pearling et commercialisé sous la marque Marine Products.

Pearling est une peinture antifouling d'aspect nacré à matrice mixte de haute performance destinée à protéger les carènes de bateaux à moteur et à voile en empêchant l'accroche des salissures. Sa grande efficacité permet d'obtenir une protection d'environ un an en fonction du milieu de navigation.

Sa formulation nacrée confère une synergie aux principes actifs antiallures associée à un aspect esthétique original et unique. Cela se traduit par une formule exempte d'oxyde de cuivre et par un taux de biocides considérablement réduit. Cette formulation spéciale convient pour tous types de coques de bateaux, y compris les coques Alu.

¹⁵³ Boat Sonic, <http://www.gom-air.com/images/BoatSonic.pdf>

¹⁵⁴ Projet PaintClean, <http://www.pole-mer-bretagne.com/paintclean.php>

¹⁵⁵ Projet EcoPaint, <http://www.polemerpaca.com/fr/domaines-d-activite/naval-et-nautisme/ecopaint-paca-91.html>

¹⁵⁶ Projet Biopaintrop, <http://www.pole-mer-bretagne.com/biopaintrop.php>

Solutions pour éviter l'utilisation d'antifoulings

Pour éviter l'utilisation des antifoulings, des alternatives existent !

- Le stockage du bateau à sec pourrait être une solution. De plus en plus de ports à sec voient le jour sur les côtes françaises.
- Le nettoyage régulier des carènes permet également d'éviter l'adhésion des salissures. Ce nettoyage peut se faire manuellement ou par des stations de lavage automatisées.
- Lorsque cela est possible l'alternance du stockage du bateau en eau de mer et en eau douce peut être une solution intéressante.

Ces aspects sont détaillés dans les volets « Pratiques et Comportements » et « Ports et Abris » du cahier des charges de l'éconavigation. Pour plus d'informations sur ces différentes alternatives n'hésitez pas à contacter le réseau EcoNav.

PEINTURES ANTIFOULING		
Aspects environnementaux	Faisabilité technico-économique	Acceptabilité sociale
<p>☹️ Peintures antifouling en général, très nocives pour l'environnement notamment pour la faune et la flore</p> <p>☹️ Les substances nocives se retrouvent dans les boues de dragage des ports ce qui entraîne des problèmes de traitement.</p> <p>😊 L'usage de TBT est aujourd'hui interdit en France.</p> <p>☹️ Effet du cuivre mal connu à grande échelle</p>	<p>☹️ Peu d'offres de choix de peintures moins impactantes aujourd'hui</p> <p>😊 Certaines peintures sont moins impactantes du fait de leur longue durée de vie</p> <p>😊 De nombreux projets prometteurs sont à l'étude</p>	<p>😊 Prise de conscience notamment avec le TBT et le problème de boues de dragage.</p>

PEINTURES ANTIFOULING

Aujourd'hui de nombreuses recherches sont orientées vers des antifoulings moins impactants sur l'environnement du fait d'une réglementation de plus en plus stricte et d'une demande croissante des usagers. Les centres de recherches ont bien avancé sur le sujet permettant ainsi à certains industriels de sortir sur le marché des produits intéressants.

Cependant, leur impact sur l'environnement n'est pas nul, et leur efficacité n'est pas toujours au rendez-vous. Nous espérons néanmoins que les nombreux projets de R&D en cours vont permettre, d'ici quelques années, de proposer de véritables alternatives écologiques aux antifoulings d'aujourd'hui.

Il est important de préciser que chaque antifouling a des propriétés différentes en termes d'efficacité, de durée de vie, de respect de la biodiversité marine, de la santé des opérateurs de génération de déchets...

Il est donc nécessaire de bien connaître son programme de navigation afin de définir l'antifouling le mieux adapté à notre usage. Il faut tenir compte du nombre de jours de navigation, du nombre d'heures de navigation/jour, de la vitesse de bateau, du mode de stockage du bateau (ancre, corps-morts, échouage), de la zone de navigation (mer, rivières, canaux), etc.

Autres facteurs d'impacts environnementaux

Produits d'hygiène et d'entretien

Les produits d'hygiène et d'entretien utilisés à bord se retrouvent la plupart du temps soit dans les eaux grises (cf. chapitre eaux grises), soit les eaux noires (cf. chapitre eaux noires). Celles-ci sont stockées et traitées à terre ou directement traitées à bord. Cependant les traitements actuels ne permettent pas d'éliminer toutes les substances chimiques présentes dans les « produits d'entretien classiques ».

Lors de l'entretien de la coque et du pont, les eaux de lavage sont rarement récupérées et traitées, les eaux sont directement versées à la mer, la présence de produits toxiques dans les produits de nettoyage présente donc des risques certains pour l'écosystème marin.

Gamme EcoVer :

La gamme **EcoVer**¹⁵⁷ certifiée EcoCert, est composée de produits d'entretien et d'hygiène respectueux de l'environnement.

Dans cette gamme nous pouvons trouver notamment les produits suivants : liquide vaisselle, liquide linge concentré, nettoyant ménager multi-usage, nettoyant WC Marine, essuie-tout biodégradable, gel douche, shampoing, dentifrice poudre menthe Per Blanc, papier toilette biodégradable

La certification EcoCert garantit que les produits respectent les conditions suivantes :

- au moins 95 % des ingrédients doivent être naturels ou d'origine naturelle
- au moins la moitié des ingrédients végétaux doivent provenir de l'agriculture biologique certifiée
- les ingrédients synthétiques, comme les colorants artificiels, les silicones, les parfums synthétiques, etc. sont exclus.

Ce label de qualité est uniquement attribué si les caractéristiques du développement durable et de l'écologie sont prioritaires sur toute la ligne : du choix des ingrédients à la production et à la distribution.

Océan respect (Uship) :

Uship propose des produits d'entretien des bateaux plus amicaux pour l'environnement: nettoyants pour coque et pont, pneumatique, cale et moteur, voile et taud, pare-battage, cabine... des produits biodégradables efficaces.

Cette gamme s'inscrit dans une démarche globale d'engagement pris par les distributeurs et la centrale, pour diminuer leur impact sur l'environnement.

Matt Chem :

Depuis 1998, la société Matt Chem Product a créé un département marine mettant en place une gamme de produits innovants conformes aux Normes Européennes et respectueux de l'environnement

Green Plaisance¹⁵⁸ :

Green Plaisance© est une société bretonne spécialisée dans la vente en ligne de produits d'entretien écologiques pour les équipements de loisirs (bateau, camping-car, caravane, mobil home, maison et jardin...). Afin de compléter son offre en direction des particuliers et des professionnels, elle développe et commercialise sous la marque Bio Loisirs© une nouvelle gamme de produits d'entretien bio-écologiques dédiée à l'univers technique des loisirs de plein air.

¹⁵⁷ Ecover développement et production de produits de lessive et de nettoyage écologique, <http://www.ecover.com/fr/fr/>

¹⁵⁸ Gamme Green Plaisance, <http://www.green-plaisance.com/>

La valeur ajoutée de la démarche est multiple. D'une part, celle-ci s'inscrit dans le cadre d'un « marketing durable » encourageant dans le domaine des loisirs, une « économie de la fonctionnalité » grâce à une mutualisation des produits d'entretien. D'autre part, l'approche éco-toxicologique exige de proposer de manière systématique une alternative écologique et sécuritaire aux produits issus de la chimie lourde, classés dangereux pour la plupart, sans rien concéder à l'efficacité.

La pierre d'argile est également un nettoyant qui suscite l'attention de plus en plus de navigateurs. Ce produit est en effet un nettoyant universel 100% naturel, économique et écologique.



Produit GreenPlaisance

D'une manière générale, dans le but d'acheter des produits d'entretien moins impactant sur l'environnement, quelques réflexes simples sont à adopter :

- Eviter d'acheter des produits avec des pictogrammes de danger sur l'étiquette



- Acheter des produits multi usage
- Penser à regarder l'origine de produits (origine locale, régionale...)
- Eviter les suremballages.
- Le cas échéant se référer aux écolabels « officiels »

PRODUITS D'HYGIENE ET D'ENTRETIEN

Aujourd'hui les différents produits d'hygiène et d'entretien écologiques présents sur le marché représentent une offre relativement diverse, souvent performante avec un coût concurrentiel par rapport aux produits classiques.

Il est cependant important de diminuer la consommation de ces produits notamment en privilégiant les produits multi-usages.

Mouillage



Impact

Sur la zone d'évitage, les ancres et les chaînes raclent, cassent, arrachent les organismes fixés sur les fonds marins. Elles peuvent également détruire des habitats. Un ancrage seul n'a pas d'impact irréversible sur les fonds. C'est la multiplication sur un site ou dans le temps qui engendre une dégradation durable. Ce n'est pas seulement l'ancre, mais également la chaîne qui, dans la zone d'évitement, porte atteinte aux milieux sous-marins.

Les mouillages fixes utilisés traditionnellement (corps morts et chaînes) nuisent également aux fonds sur lesquels ils sont placés : la ligne de mouillage racle le fond autour du corps mort.

Ce phénomène s'aggrave lorsque les corps morts se découvrent à marée basse : la zone dégradée autour du corps-mort est maximum. Cependant ces impacts sont mal connus par le grand public.

Tout d'abord pour diminuer l'impact de l'ancrage, il est nécessaire de bien choisir sa zone d'ancrage. Il est préférable que celle-ci soit composée de sable. Il est possible de la repérer à l'aide d'un sondeur ou même dans le cas des navires de plaisance à l'œil nu par faible profondeur.

Quelques équipements existent pour réduire l'impact de l'ancrage sur les fonds marins. Parmi ceux-ci nous pouvons citer les ancres écologiques, les orins ou encore les bouts plombés. Cependant ceux-ci ne sont encore que trop peu répandus.

Equipements spécifiques

Etre équipé d'un orin

Une bouée attachée à l'ancre (un orin) permet de localiser la position de l'ancre et de la remonter verticalement, en évitant de la faire racler sur le sol.

Ancre spécifiques : exemple de l'Ancr-éco¹⁵⁹

L'**ancr-éco** est une ancre marine équipée d'un système à déclenchement mécanique, permettant le verrouillage et le déverrouillage des pales dans les phases de descente et de remontée de l'ancre. Ce système est lié à l'action de traction du bateau et du poids de la chaîne.

Dans la phase d'ancrage, l'ancre descend et les pales tournent librement autour de leur axe grâce aux petites pales arrières, le mouvement arrière du navire libère la chaîne dont le poids et la longueur enclencheront le verrouillage de l'ancre lorsque la longueur requise sera atteinte (3 à 4 fois la hauteur d'eau). Donc pas de labourage du fond lors de cette phase d'ancrage.

Dans la phase de remontée, le navire avance vers son point d'ancrage en remontant sa chaîne, action qui annule la tension et réduit le poids sur le levier à l'extrémité de la verge. Le déblocage des pales s'effectue alors et l'ancre est remontée pointes vers le bas dans le prolongement de la verge sans détérioration de la flore (contrairement à une ancre classique qui remonte chargée d'algues).

Le déverrouillage des pales lors de sa remontée, évite à l'ancr-éco de rester bloquée au fond, comme c'est souvent le cas sur fond rocheux avec une ancre classique, obligeant le plaisancier à l'abandon de l'ensemble ancre-chaîne.

¹⁵⁹ Système ancr-éco, <http://www.ancr-eco.net/>

Le **bout plombé** peut également être une solution pour diminuer la longueur de la chaîne.

Nautiscaphe¹⁶⁰ propose des systèmes d'ancrage à ellipses destinés à l'origine aux mouillages forains. Ce système vise à éviter autant que possible d'abimer les fonds marins.

Il consiste en une verge de 75cm à 2M de long selon la nature des fonds, avec une à trois spires pour la fixation.



Produit Nautiscaphe ; ©DR

Dans la même gamme de produits il existe également les ancrs à vis Screw et les ancrs hélicoïdales Harmony...

Vêtements de mer

D'un point de vue de l'éco-alimentation, il est également intéressant de se pencher sur les vêtements, combinaisons, chaussures que nous portons à bord des bateaux. Aujourd'hui l'impact environnemental de ces produits est non négligeable car la majorité de ces produits sont des dérivés du pétrole. Les alternatives proposées sont très faibles cependant, depuis peu de temps, des grandes marques commercialisent des lignes de vêtements « moins impactantes sur l'environnement »

Par exemple la société **Timberland**¹⁶¹ a lancé cet été une chaussure recyclable à 80 % : la chaussure Earthkeepers 2.0. De plus, cette chaussure possède une semelle Green RubberTM composée à 42 % de pneus recyclés. Cette chaussure peut être rapportée dans les magasins Timberland lorsqu'elle arrive en fin de vie. Elle sera alors renvoyée dans l'usine où ses différents composants seront réutilisés pour la fabrication de nouvelles chaussures.

De son côté **Henri Lloyd**¹⁶² a lancé la gamme Blue Eco, avec pour ambition de devenir un fabricant « éco responsable » à travers un programme de recyclage à l'infini. Le principe repose sur le processus de recyclage fibre-à-fibre. Les anciens produits seront transformés en une nouvelle matière première, réduisant ainsi de manière significative les émissions de CO₂ et la consommation d'énergie.

Associé à Teijin, un fabricant japonais de tissu et de produits chimiques pionnier dans ce domaine, Henri Lloyd a développé le tissu TP Eco, totalement recyclable, étanche et respirant.

BodyGlove "Eco", une combi qui combine le surf et l'écologie.

La marque de sports nautiques californienne Bodyglove, a lancé en 2007, « ECO », la première combinaison 100% écologique¹⁶³. Cette combinaison a nécessité zéro produit issu de la pétrochimie, et un dixième seulement de l'énergie nécessaire pour produire une combinaison classique, grâce à deux matériaux « maison » écologiques et non toxiques : le BioStretch à l'intérieur (un caoutchouc synthétique fait sans pétrochimie, à partir de carbonate de calcium), et l'EcoFlex à l'extérieur, un textile d'origine végétale, fait à partir d'amidon de maïs. Les impressions sur la combinaison sont réalisées avec une encre à base d'eau et la fermeture de la poche à clefs extérieure est en plastique recyclé.

¹⁶⁰ Nautiscaphe, <http://www.nautiscaphe-atlantique.com>

¹⁶¹ Timberland, chaussures recyclable à 80%, <http://www.earthkeeper.com/Gear/Earthkeepers-2-dot-0>

¹⁶² Henri Lloyd, gamme Blue Eco, <http://www.henrilloyd.com/store/p-105-blue-eco-hi-fit.aspx>

¹⁶³ BodyGlove, <http://www.bodyglove.com/eco/>

Chapitre 3 - Fin de vie

Gisement

Navires de plaisance¹⁶⁴

La question du démantèlement des navires de plaisance relève d'une problématique spécifique de celle des autres flottes, pour plusieurs raisons.

D'une part la nature des matériaux de construction, principalement le composite verre résine (CVR), ne permet d'envisager qu'une seule voie de valorisation. D'autre part il s'agit avant tout d'un problème à régler à l'échelon national, même si le contexte européen n'est pas à négliger en conservant à l'esprit le risque d'une fuite de l'usager vers d'autres pavillons communautaires moins contraignants.

La première problématique à aborder est celle relative à l'identification du gisement. Il convient ensuite de dissocier le stock, accumulé au fil du temps en l'absence de filière de traitement, et le flux annuel après épuisement de ce stock.

La seconde concerne bien entendu la valorisation des matériaux pouvant être récupérés. Cette filière se composant principalement de matériaux composites, la question de la rentabilité économique est d'autant plus complexe.



© DDNR

Le chiffre de 20 000 navires par an à démanteler a souvent été avancé. Cependant ce chiffre ne semble pas réaliste pour plusieurs raisons. D'une part cette valeur se rapportait au nombre de nouvelles immatriculations (20 000 à 25 000 par an), or les nouvelles immatriculations ne concernent pas exclusivement des navires neufs. La logique d'une immatriculation pour une sortie de flotte ne peut donc être considérée comme modèle. D'autre part, on peut imaginer qu'un certain nombre de navires de petites dimensions (gonflables, semi rigides, petits voiliers, canoës...) finissent dans la filière classique des déchets.

En conclusion sur ces données chiffrées, il apparaît comme possible de considérer qu'il existe un stock de navires à démanteler localisés en très grande majorité dans des espaces privés : chez des revendeurs de navire, dans des chantiers, des espaces d'hivernage ou chez des particuliers. Une fois la question de ce stock traité, le flux annuel sera relativement faible.

L'opération de démantèlement d'un navire de plaisance étant, du fait de la nature des matériaux, une opération « déficitaire », la mise en place d'une filière de démantèlement n'est pas suffisante. Il est nécessaire d'envisager un dispositif économique incitatif pour les propriétaires.

¹⁶⁴ Dans ce chapitre « Fin de vie », plusieurs textes et graphiques sont extraits du rapport de la mission parlementaire « démantèlement des navires », Grenelle de la Mer, juin 2010

Navires de pêches

D'après le rapport de juin 2010, de la Mission parlementaire « démantèlement des navires », du Grenelle de la Mer, la répartition par tranches d'âges entre la métropole et les territoires d'Outre Mer est la suivante :

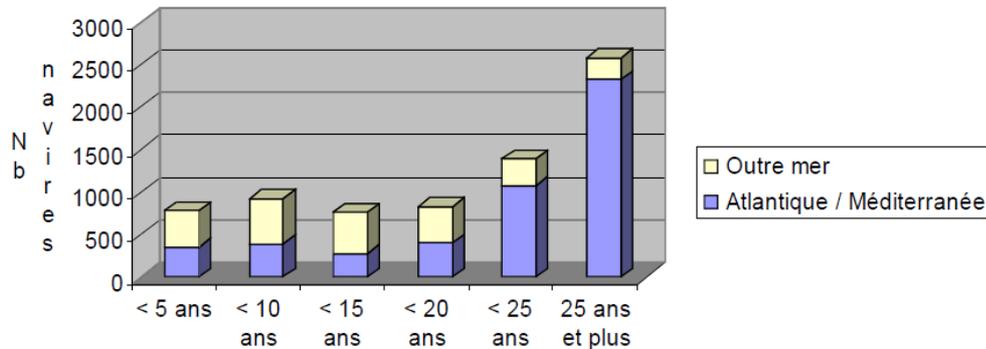


Figure 7: Répartition géographique par tranches d'âges

66% des navires ont plus de 20 ans, soit près de 4816 navires. Le gisement potentiel de navires à démanteler est donc relativement conséquent.

En considérant que les navires de moins de 12 m sont assimilables à des navires de plaisance du point de vue de la problématique de la déconstruction (nature des matériaux et possibilité de transport par voies routière), et les navires de plus de 12 m à des navires de commerce, le gisement potentiel de navires à démanteler serait donc le suivant :

- Plus de 12 mètres (filière commerce) → 869 navires soit 18%
- Moins de 12 mètres (filière plaisance) → 3947 soit 82 %

Ce gisement est à considérer uniquement comme un potentiel, pris comme hypothèse de départ pour le dimensionnement d'un outil de démantèlement.

La sortie effective des navires de la flotte répond à d'autres paramètres plus complexes que la simple problématique de l'âge du navire.

Navires fluviaux

Tout comme la flotte de pêche, la flotte fluviale peut se répartir sur deux filières de démantèlement, l'une composite pour les unités de plaisance et l'autre sur le métallique pour les marchandises.

La flotte fluviale est captive de son réseau et nécessite une filière adaptée à la configuration des voies navigables¹⁶⁵.

La flotte fluviale reste cependant très modeste en terme de tonnage et de nombre de navires au regard des autres flottes. Il existe cependant un réel besoin de renouvellement de la flotte de marchandises qui est une flotte âgée et de capacités restreintes face à la concurrence européenne. Le renouvellement de cette flotte est actuellement estimé à une cinquantaine d'unités par an. L'âge moyen de la flotte de commerce en particulier nécessite que la question de son renouvellement et de sa modernisation soit traitée dans les prochaines années.

¹⁶⁵ Grenelle de la Mer, Mission parlementaire « démantèlement des navires », rapport final juin 2010

Navires de commerce

Le nombre de navires démantelés chaque année est particulièrement fluctuant et très fortement lié à l'activité économique mondiale. En 2009, l'impact de la crise économique étant, 25 millions d'UMS sont sorties de flotte, avec une moyenne d'âge de 30 ans¹⁶⁶.

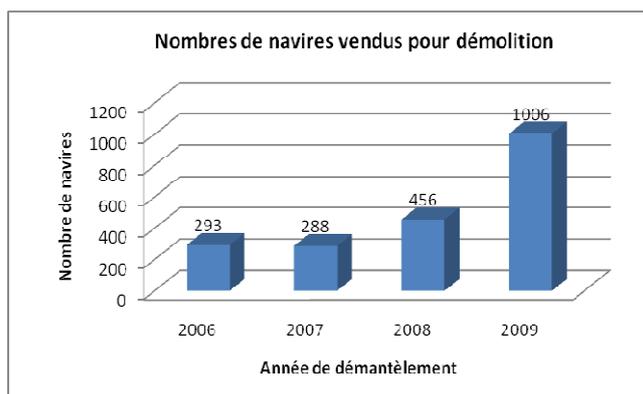
En 2008 ce chiffre était d'environ 8 millions d'UMS¹⁶⁷.

Bilan mondial 2009 des navires partis à la démolition¹⁶⁸

Depuis quatre ans, Robin des Bois étudie le marché de la démolition des navires grâce à la mobilisation et l'analyse d'une trentaine de sources bibliographiques.

Nombre de navires démantelés

Robin des Bois a comptabilisé 293 navires vendus pour la démolition en 2006, 288 en 2007 et 456 en 2008. En 2009, 1006 navires sont sortis de flotte, soit plus de deux fois le volume de 2008 et trois fois celui de 2006. Le poids total de métaux recyclés atteint plus de 8,2 millions de tonnes, cinq fois le tonnage de 2006.

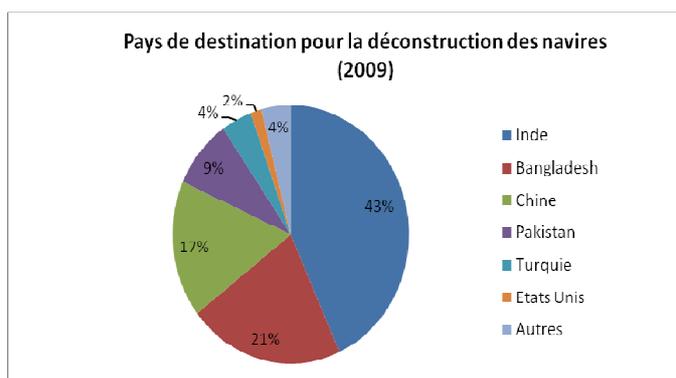


Durant cette année des records, le rythme des navires quittant les océans s'est à peine ralenti pendant les mois d'été. La crise financière mondiale a lourdement pesé sur les échanges commerciaux ; les grands armements ont massivement envoyé à la casse les navires les plus anciens pour s'adapter à la chute des taux de fret et rentabiliser leurs navires récents.

En dépit de l'explosion du nombre de navires proposés à la démolition, les tarifs des chantiers asiatiques ont sensiblement progressé, passant de 200 \$ la tonne en début d'année à près de 300 \$ en décembre 2009.

Les pays de destinations des navires à démanteler

En 2009, l'Inde a été pour la deuxième année consécutive la première destination de démolition avec 435 navires (43%). Le Bangladesh arrive en deuxième position avec 214 navires (21%) mais est talonné par la Chine, 173 navires (17%). La Chine est le vainqueur de l'année avec un afflux record de navires en provenance des armateurs chinois ainsi que des armateurs japonais et européens sensibles à un affichage de « démantèlement vert ».



Sur les 1006 navires, 409 (41 %) étaient sous pavillon européen ou appartenait à des armateurs établis dans l'Union Européenne ou dans l'Association Européenne de Libre Echange (AELE).

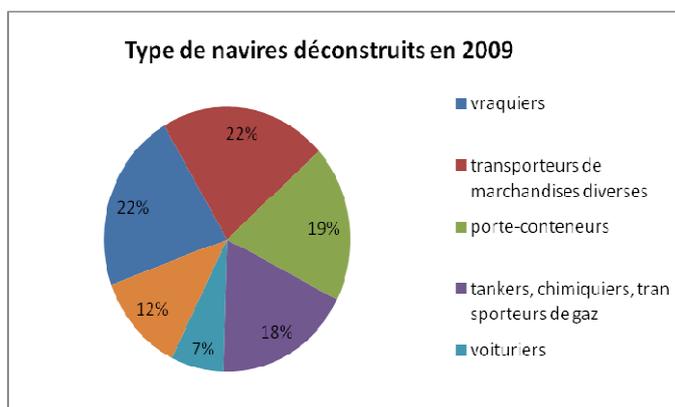
¹⁶⁶ IHS Fairplay, <http://www.ihsfairplay.com/>

¹⁶⁷ Grenelle de la Mer, Mission parlementaire « démantèlement des navires », rapport final juin 2010

¹⁶⁸ Association Robin des bois, A la casse.com n°16, Bulletin d'information et d'analyses sur la démolition des navires, le 9 juillet 2009, <http://www.robindesbois.org/>

Les types de bateaux déconstruits en 2009

En 2009, la catégorie des tankers, chimiquiers et transporteurs de gaz n'est plus la première parmi tous les navires partis pour la démolition; elle rétrograde en quatrième position et ne représente cette année que 18% des navires avec 180 unités contre 33% en 2008 et 50% les années précédentes.



Une bonne nouvelle : le nombre de navires sous-normes est encore en augmentation parmi les navires partant à la casse. Sur 1006 navires, 579 (58 %) ont été dans les années antérieures détenus avec leurs équipages dans les ports mondiaux et en particulier en Europe pour non-conformité aux règles de sécurité internationales. Les contrôles dans l'Etat du port poussent les mauvais navires vers la sortie.

Navires militaires

Le total du stock constitué à la fin de l'année 2009 représente 76 coques pour un tonnage de 98 404 tonnes. Les sous-marins ne sont pas comptabilisés dans cet inventaire.

Le flux moyen annuel estimé, entre 2011 et 2019, serait quant à lui d'environ 10 000 tonnes^{169,170}.



¹⁶⁹ Grenelle de la Mer, Mission parlementaire « démantèlement des navires », rapport final juin 2010

¹⁷⁰ Source Marine Nationale

Navires de « petites tailles » : plaisance, pêche côtière, fluvial...

Cas des composites

Dans le cas de la construction navale, le composite est majoritairement constitué de deux éléments, (verre et polyester) présentant un faible intérêt économique. Aujourd'hui plusieurs projets de recherche sont en cours pour développer des filières de valorisation de ces composites.

Voici le détail de quelques uns de ces projets. Ces présentations sont tirées de l'annexe X du rapport final de juin 2009 de la mission parlementaire « démantèlement des navires », du Grenelle de la Mer.

La valorisation en fin de vie

Aujourd'hui la co-combustion en cimenterie est le seul exemple opérationnel à échelle industrielle de valorisation pour les matériaux issus de la déconstruction des navires de plaisance.

Ces matières posent des problèmes d'homogénéité aux cimentiers, qui ne rémunèrent donc généralement pas cet apport. Par ailleurs, l'injection de composite dans le four, oblige le cimentier à arrêter sa production pour changer de brûleur. Or les faibles volumes de matière apportés ne justifient généralement pas ces contraintes logistiques.

Ces composites broyés finissent actuellement, pour une grande partie, en centre d'enfouissement.

L'introduction de composite verre/résine (CVR) dans la filière de la cimenterie présente plusieurs avantages :

- Apport calorifique par combustion de la résine,
- Apport de silice et de carbonate de calcium par la présence de fibres de verre.

A ces avantages se posent un certain nombre de freins à la valorisation du CVR dans cette filière

Ces matières posent des problèmes d'homogénéité aux cimentiers, qui ne rémunèrent donc généralement pas cet apport. Par ailleurs, l'injection de composite dans le four, oblige le cimentier à arrêter sa production pour changer de brûleur. Or les faibles volumes de matière apportés ne justifient généralement pas ces contraintes logistiques.

Ces composites broyés finissent actuellement, pour une grande partie, en centre d'enfouissement.

D'autres pistes de valorisation semblent intéressantes :

L'utilisation en tant que charge

L'utilisation du CVR en tant que charge de matériaux composites est une solution nécessitant quelques développements. Réduit en fines particules le CVR est adapté pour la fonction de charges dans des matériaux thermoplastiques. Le développement de bétons utilisant la présence des fibres de verre comme principe d'anti-fissuration est également à envisager.

Cette voie de valorisation nécessite cependant le développement de nouvelles technologies du broyage afin d'obtenir des calibres d'éléments compatibles avec ce type d'emploi.

La séparation fibres / matrices

Des procédés innovants permettant la séparation des matériaux sont en cours de développement, mais n'ont pas encore atteint le stade de l'industrialisation.

Au delà de la faisabilité technique de cette opération, se pose la question de la mise sur le marché du matériel récupéré. En effet, pour être économiquement viable, le coût de collecte et de traitement des matériaux composites devra être compétitif avec la fibre de verre déjà utilisée. Il faudra également voir si la fibre de verre ainsi obtenue ne peut pas être directement réintroduite dans le four du fabricant de fibre de verre, en amont des chantiers navals.

A ce jour l'intérêt économique de cette séparation pour les composites verres / résine n'est pas acquis.

Séparation par solvolyse

Deux thèses sur le recyclage des composites (verre/polyester et carbone/époxy) par solvolyse, sont en travaux à l'Institut Catholique d'Arts et Métiers (ICAM) de Nantes. Des partenaires industriels des filières « automobile » et « aéronautique » sont associés aux projets.

Le principe de la solvolyse consiste à séparer les fibres de la matrice en présence d'un solvant.

A l'issue de la réaction, deux phases sont récupérées :

- Une phase solide constituée des fibres :
- Une phase liquide constituée d'un mélange de solvant et de résine

Les premiers éléments d'analyse économique du procédé, pour des fibres de carbone, pour une capacité de 300 tonnes par an concluent à une forte probabilité d'équilibre économique voire de rentabilité du procédé (Remarque : à comparer à un prix de fibre neuve sur le marché d'environ 30€/t).

Cependant l'état d'avancement des travaux ne permet pas pour l'instant de se prononcer sur la qualité des matériaux extraits. Il est donc encore prématuré pour envisager l'avenir d'un tel procédé.

La technologie « XCrusher™ »

La société « Camille » exploite un procédé utilisant la technologie des puissances pulsées dénommé « XCrusher™ ».

Cette technologie a été initialement développée dans le cadre des programmes de recherche militaire pour une application de « canon électrique ». Cette technologie a été développée par le groupe Thalès.

Ce procédé trouve aujourd'hui des applications dans le domaine de la fragmentation, de la pulvérisation et de la séparation. C'est sur cette dernière capacité que des tests ont été réalisés sur des matériaux composites.

Les éléments sont immergés dans une solution (eau douce, eau de mer,...). Un ensemble de condensateurs est chargé puis déchargé par commutation rapide de l'ordre de la nanoseconde. L'onde sonore et subsonique, associée au rayonnement électromagnétique va provoquer la séparation des différents éléments. Après traitement il en résulte d'une part des fibres libérées de la matrice et d'autre part de la résine sous forme de poudre en suspension dans le bain. Les premiers résultats en laboratoire semblent indiquer que la fibre de verre peut en effet être récupérée dans un bon état, et à un faible coût énergétique. Ce procédé est aujourd'hui industrialisé pour la création de nano-diamants et vise à se développer dans le cadre d'applications minières.



Exemples de projets de déconstruction de navires de petite taille allant dans le sens du développement durable

Des projets chantiers de déconstruction à vertu sociale

Association Genêts d'Or

L'association des Genêts d'Or, en collaboration avec Morlaix Communauté, mène actuellement un projet dont les objectifs sont de déconstruire des bateaux de plaisance en fin de vie, de créer des emplois et de réinsérer des personnes en difficultés.

Kroc'Boat

Dans la même philosophie, Didier Monchatre, le directeur de Kroc'Can, entreprise toulonnaise de réinsertion, lance Kroc'Boat, une filière « globale » de recyclage pour les bateaux de plaisance hors d'usage (BPHU) de la région.

Des chantiers de déconstruction opérationnels

La société «**Dépollution Déconstruction Nautiques Recyclage**»¹⁷¹, spécialisée dans la déconstruction et la dépollution des Bateaux de Plaisance en Fin de Vie, assure le transport, le grutage, et le démantèlement, en utilisant des procédures de tri suivant les chartes en respect de l'environnement.

Le coût de déconstruction annoncé par DDNR s'élève à 98 centimes d'euro par kilo de polyester récupéré. Et l'idée semble séduire. Selon Dépollution Nautique, de plus en plus de plaisanciers prennent spontanément contact avec l'entreprise lyonnaise pour se débarrasser proprement de leur vieille coque

En parallèle, la société porte ses recherches sur le recyclage des coques de bateaux. En effet, la plupart des bateaux de plaisance, sont fabriqués en matériaux composites : fibre de verre et résine polyester, matériaux qui ne sont pas faciles à valoriser. Mais aujourd'hui DDNR a réussi à séparer la fibre de la résine.

Tableau : devenir des déchets et leur filière de recyclage

Verre	Broyé et recyclé par fusion
Métaux	Broyage, recyclage en aciérie
Equipements électroniques, électriques	Trié séparation des plastique et recyclage
Bois	Recyclage valorisation énergétique
Plastiques	Recyclage si parfaitement trié
Batteries	Recyclées pour le plomb
Fusée de détresse (explosifs)	Recyclées
Huiles	Centre de dépollution, analyse et séparation pour recyclage
Bois souillé	combustible
Voiles	Association recyclage
Fuel	Recyclage
Tissus Vaigrage	Association recyclage
Polyester	Recherche recyclage

¹⁷¹ Dépollution et Déconstruction Nautique, www.depollutionnautique.com/

APER

La Fédération des Industries Nautiques (FIN) a travaillé depuis 2003 à la création d'une filière BPHU (Bateaux de Plaisance Hors d'Usage) basée sur l'exemple des éco-organismes. La FIN a finalement préféré créer l'**APER (Association pour la Plaisance Eco-Responsable)**, qui a pour vocation d'animer un réseau de centres d'informations et de démolisseurs agréés. Les points d'informations (magasins d'accastillages, chantiers navals...) orientent les particuliers désireux de détruire leur navire dans des conditions respectueuses de l'environnement vers des démolisseurs (professionnels de la gestion des déchets) agréés par l'APER sur la base d'un cahier des charges basé sur la réglementation existante.

L'APER a procédé à Caen à un programme de démantèlement test qui a conduit à trois constats :

- l'absence de localisation et d'estimation précise du gisement ;
- le coût élevé de démantèlement et la part importante due au transport ;
- l'attachement des propriétaires à leur navire, même lorsque celui-ci n'est plus en état de naviguer.

L'APER, dans sa nouvelle configuration, opérationnelle depuis le 1^{er} janvier 2010, est en attente de retour d'expérience vis-à-vis de la mise en place de son réseau de points conseil et de chantiers agréés.

Les premiers essais de démantèlement par l'APER ont fait ressortir des coûts très élevés pour le démantèlement des navires en CVR. Il a été également remarqué que le coût de démantèlement d'un navire augmente de manière exponentielle en fonction de la taille du navire.

Déconstruction industrielle

Certains grands groupes spécialisés dans la gestion des déchets (ex : Véolia, Sita) se sont intéressés à la déconstruction des bateaux de plaisance.

Au niveau industriel des tests ont été réalisés. On peut dire qu'aujourd'hui les solutions techniques pour déconstruire les BPHU existent. Cependant du fait du faible potentiel financier de valorisation des BPHU ces techniques ne se sont pas rentables à l'heure actuelle.

Le Prix de Revient Global du traitement d'un bateau de plaisance de 6 mètres atteint 1 320 € HT, qui se répartissent comme suit¹⁷² :

- 23% (300 € HT) - Collecte et transport amont
- 61% (820 € HT) – Déconstruction, en centre
- 6,1% (80 € HT = 170 – 90 € de recettes issues du recyclage) – Transport et traitement des déchets dans les filières aval
- 9,2 % (120 € HT) - Eco-organisme et frais de gestion

¹⁷² Source : ADEME, Etude de la Fin de Vie des moyens de Transport en France (hors VHU), Novembre 2006

Bateaux de pêche



Depuis peu, des entreprises telles que « Veolia Propreté » ou « Sita Suez Environnement » développent l'activité de démantèlement de bateaux.

Exemple de bilan réalisé par SITA suite au démantèlement de deux bateaux pilotes de 24 mètres et de 250 tonnes chacun¹⁷³:

Cahier des charges

- Diagnostic du chalutier et identification des polluants : amiante, PCB
- Identification des pièces détachées, éléments moteurs
- Élaboration des documents réglementaires comme le PPSPS (Plan Particulier de Sécurité et de Protection de la Santé)
- Préparation du chantier à quai : étanchéification du site bétonné, pose d'andains de sable
- Dépollution des navires qui comprend le dégazage, le pompage, le curage et les traitements des résidus d'hydrocarbures
- Démantèlement du chalutier : découpes, préparation des matériaux recyclables, déchets industriels banals (DIB) et déchets industriels spéciaux (DIS)
- Gestion des déchets avec tri sélectif
- Valorisation des matières recyclables : métaux ferreux et non ferreux, aluminium, plastiques, DEEE, bois
- Établissement d'un mémoire de déconstruction (technique, bilan matière)

Bilan matières

Pour les deux premiers bateaux démantelés, le bilan des matières recyclées et matériels réutilisés est positif. En effet 95 % des déchets ont pu être réutilisés ou valorisés. De chacun de ces bateaux ont été extraits et valorisés 17m³ de déchets hydrocarbonés lors de la première phase de dépollution. Plus de 200 tonnes de matières, métaux ferreux et non ferreux, bois, plastiques ont été recyclées. Les gravats ont été concassés pour être réutilisés dans les travaux publics. Les moteurs et systèmes de propulsion ont été récupérés pour la vente en pièces détachées. Seules les tonnes de déchets industriels banals (DIB) restantes ont été traitées ou éliminées dans le centre de stockage de Gueltas (56). Les batteries ont été récupérées par l'armateur pour les deux bateaux.

MATIÈRE	QUANTITÉ	FILIÈRE DE VALORISATION
Métaux ferreux	200 tonnes	Fonderie et export
Métaux non ferreux	10 tonnes	Affineur
Bois	4,5 tonnes	Préparation, broyage pour compostage et panneaux
Plastiques	1,5 tonne	Régénération des PA6 (polyamide)
Gravats	10 tonnes	Concassage et Travaux publics
DIB (mousses, chiffons...)	12 tonnes	CSDU de Gueltas (56)
Équipements	12 tonnes	Préparation & revente
TOTAL	250 tonnes	

¹⁷³ SITA, dossier de presse, le démantèlement des bateaux de pêche, une nouvelle activité pour le spécialiste de la valorisation et de l'élimination des déchets, octobre 2008

Bateaux de commerce

Certains pays comme l'Inde, le Bangladesh et le Pakistan pratiquent l'échouage des navires sur de grandes plages abritées et soumises à des marées de forte amplitude.

Après allègement, les navires sont rapprochés autant que possible de la terre avec de puissants treuils, puis découpés en blocs au chalumeau.

Dans de nombreux chantiers le personnel ne dispose de quasiment aucun équipement de base. Les périmètres de sécurité autour des zones de découpe sont inexistantes, les charges portées sont souvent excessivement lourdes. Les risques de brûlures et d'intoxication sont nombreux, en effet les produits toxiques ne sont pas identifiés et les espaces du navire sont souvent mal nettoyés.

Le désamiantage est réalisé sans moyens de protection individuels ni centrales de filtration.

Le principe même du démantèlement sur une plage conduit inévitablement à une pollution de l'eau par les résidus d'hydrocarbures (fuel, huile, graisse) provenant des soutes et des équipements du navire.

La découpe des tôles se fait systématiquement au chalumeau oxycoupeur, ce qui génère des gaz et des particules toxiques résultant de la combustion des peintures et des résidus adhérent aux tôles.

Des initiatives environnementales et sociales apparaissent, tendant à améliorer la situation actuelle, mais nous sommes encore loin d'une déconstruction acceptable.

Prise de conscience

Fondée en 2007 sur une initiative Danoise et Hollandaise, l'International Ship Recycling Association (ISRA)¹⁷⁴ est une association de démolisseurs de navires chinois, turcs, hollandais, US, dont le but est de développer des méthodes plus respectueuses de l'environnement et d'avoir des relations directes avec l'OMI.

Ces chantiers cherchent également à se démarquer en obtenant les normes ISO de qualité 9001 et environnementale 14001. La toute nouvelle ISO 30.000¹⁷⁵ a été élaborée pour aider les parties concernées dans la mise en œuvre uniforme des prescriptions de l'OMI pour le recyclage des navires.

Les Chinois vont prochainement mettre en service le premier chantier d'éco-démolition « Greendock » (brevet Hollandais) à Jiangmen¹⁷⁶.

Le principe de ce chantier consiste à recevoir le navire à démolir dans une cale sèche équipée d'un fond mobile. Après démontage des superstructures, le fond mobile remonte le navire au niveau de la plateforme générale du chantier.

Le tronçonnage du navire peut alors commencer, les segments étant transportés vers des aires de découpe voisines. Toutes ces opérations ont lieu à sec et dans des zones bétonnées, assurant un parfait contrôle des diverses phases de la déconstruction.



¹⁷⁴ International Ship Recycling Association (ISRA), <http://www.isra-dis.com/>

¹⁷⁵ ISO 30.000, <http://www.iso.org/iso/fr/pressrelease.htm?refid=Ref1105>

¹⁷⁶ Projet Greendock, <http://www.greendock.nl>

Moyens administratifs

Bateau de plaisance

La filière de déconstruction des bateaux de plaisance rencontre quelques difficultés à se développer. Les deux principaux problèmes sont tout d'abord un problème d'éthique mais également un problème économique.

Problème éthique

Aujourd'hui il est difficile, pour de nombreux plaisanciers, d'accepter d'envoyer son bateau à déconstruire. Le bateau d'occasion a une valeur « marchande » et peut être remis en état ce qui augmente encore la difficulté pour le plaisancier à s'en séparer.

Problème économique

Actuellement le potentiel de valorisation des bateaux en fin de vie est plutôt faible d'où un coût élevé (excepté pour les bateaux en acier ou en aluminium).

L'opération de déconstruction d'un navire de plaisance en composite verre résine, ne peut-être une opération « rentable » pour son propriétaire et représente même un coût relativement dissuasif.

Pour pallier à ce problème la mission parlementaire « démantèlement des navires » du Grenelle de la mer propose les solutions suivantes¹⁷⁷ :

- Mise en place d'une cotisation annuelle pour l'ensemble des navires de plaisance immatriculés, permettant au plaisancier de bénéficier de la gratuité de l'opération de démantèlement de son navire.
- Création d'une éco taxe sur la vente des navires neufs. Son taux est variable en fonction de critères objectifs sur la « recyclabilité » du navire (ex : pourcentage de CVR ou pourcentage de matériaux valorisables).
- Création d'un fond plaisance utilisé pour soutenir les activités de recherche en matière de valorisation des matériaux composites, mais également pour le développement de l'écoconception des navires.

Navire de pêche

Plan de sortie de flotte

Aujourd'hui les navires de plus de 10 mètres font l'objet de plan de sortie de flotte

Depuis 2007, le ministère de l'Agriculture et de la Pêche, dans le cadre de l'adaptation de la flottille de pêche à la politique européenne, s'est engagé à soutenir financièrement les armateurs mettant fin à leur activité, sous réserve de la destruction de leurs bateaux dans des conditions respectueuses de l'environnement. En 2007, le plan a concerné 171 navires en France métropolitaine et 176 navires en 2008. Des subventions de 150.000 à 600.000 € sont accordées par bateau, en fonction de sa longueur, de son âge, de la puissance du moteur... (Arrêté du 29 juillet 2008). En 2007, le total des indemnités est évalué à près de 29 M€ en 2007 et 41M€ en 2008.

Navire de commerce

La convention de Bâle vise à réduire les mouvements transfrontaliers de déchets dangereux et à interdire leur exportation vers des pays ne disposant pas de moyens pour les traiter.

L'OMI (Organisation Maritime Internationale) a rédigé en 2003 des directives sur la démolition des navires. On y trouve le principe du « Green Passport », un inventaire des matériaux nocifs inclus dans la construction du navire. Cet inventaire serait produit par le chantier constructeur puis transmis aux propriétaires successifs, mis à jour par ceux-ci et enfin remis au chantier afin d'organiser la démolition en toute connaissance de cause.

¹⁷⁷ Grenelle de la Mer, Mission parlementaire « démantèlement des navires », rapport final juin 2010

Une première convention de l'OMI sur le démantèlement des navires¹⁷⁸

66 pays ont signé le 15 mai 2009, la première convention sur le démantèlement des navires. Cette convention prévoit que les armateurs fournissent un inventaire des matériaux dangereux du navire avant de l'envoyer à la casse.

Cependant plusieurs associations environnementales dénoncent un texte décevant pour l'environnement et les travailleurs, rapporte l'AFP. Le texte ne prévoit pas de mettre fin à l'échouage de navires à marée haute sur de simples plages qui ne disposent pas d'infrastructures pour limiter les risques sanitaires et environnementaux. D'après le porte-parole de l'OMI, cet accord constitue «un très grand pas en avant en termes de santé et sécurité des travailleurs de cette industrie et pour la protection de l'environnement des navires en fin de vie».

ISO 30000

L'ISO a lancé le premier document d'une nouvelle série relative aux systèmes de management pour le recyclage des navires. La nouvelle série, ISO 30000, Systèmes de management de recyclage des navires, contribuera à la protection de l'environnement et augmentera la sécurité des travailleurs.

La série ISO 30000 a donc pour but d'apporter une assistance aux organisations qui appliquent ou améliorent un système de management du recyclage des navires, en donnant des lignes directrices pour l'attribution des ressources et responsabilités et pour l'évaluation permanente des pratiques, procédures et processus.

La norme ISO 30000 a été élaborée avec la coopération de l'OMI et d'autres organisations internationales. Elle soutiendra et complétera les travaux relatifs aux Conventions, lignes directrices et règlements de l'OMI et aux futures prescriptions de l'OMI en matière de recyclage des navires, ainsi que les travaux du Groupe de travail OMI/OIT (Organisation internationale du travail)/PNUE (Programme des Nations Unies pour l'environnement - Convention de Bâle

GESTION DES BATEAUX EN FIN DE VIE :

La déconstruction des navires est aujourd'hui problématique. Des solutions de démantèlement respectant l'environnement existent dans le secteur de la pêche, de la plaisance ou de la marine marchande.

Cependant les propriétaires des navires ont pour la plupart recours à des solutions moins coûteuses mais également moins scrupuleuses pour l'environnement (bateaux de plaisance à l'abandon, cimetière de bateaux de pêche, chantier de démantèlement de navires peu respectueux de l'environnement et des travailleurs).

Nous observons depuis quelques années une dénonciation de ces pratiques et de nouvelles solutions sont à l'étude. Cependant, sans une prise de position forte des gouvernements et une évolution favorable de la réglementation, le choix du moindre coût sera souvent préféré au respect de l'environnement. (Obligation de déconstruire le bateau dans de bonnes conditions, développement de la responsabilité élargie du producteur, création d'un éco-organisme pour les bateaux de plaisance, etc.).

L'analyse des difficultés de recyclage de certains matériaux doit servir à influencer l'éco-conception des futurs bateaux.

Une question doit également se poser avant de déconstruire, n'y a-t-il pas d'autres solutions comme la valorisation culturelle, pédagogique, patrimoniale, etc.

¹⁷⁸ Journal de l'Environnement, « Navires en fin de vie: la première convention internationale est décevante », article paru le 15/05/2009

Chapitre 4 - Autres valeurs de l'éconavigation

En plus des nombreux aspects cités précédemment, nous souhaitons élargir l'approche « éconautique » à d'autres thèmes, en phase avec les valeurs défendues par le réseau EcoNav.

Ethique

La prise en compte du caractère « éthique » lors de la construction, l'utilisation ou la déconstruction d'un navire est une valeur défendue par le réseau EcoNav. Nous souhaitons par exemple soutenir les chantiers « locaux » au long du littoral français ou les chantiers spécialisés pour permettre l'insertion de personnes handicapés dans le monde professionnel.

Atelier Cap Vert¹⁷⁹

Créé en 1998, l'association Cap Vert, a pour objet premier, l'insertion sociale et professionnelle, en utilisant comme support la construction et l'activité nautique, principalement en direction de publics de 18 à 30 ans. En 2003, l'atelier Cap Vert a créé un chantier d'insertion de construction et de maintenance nautique, dans le cadre de l'économie sociale et solidaire. L'association organise aussi des séjours voiles à caractère éducatif, pour différents publics en situation d'exclusion ou de marginalisation sociale, afin de mener une démarche de sensibilisation au milieu maritime et fluvial.

A ce jour, Cap Vert élabore des projets de construction nautique dans le but de tester l'usage de bois locaux et différents produits « Eco » dont des tissus de chanvre et des nouvelles résines à base végétale.

Innovation

Trouver des alternatives aux composites, aux moteurs thermiques, aux matériaux de synthèse dans les équipements et les aménagements représente un important défis. Seule une politique résolument orientée Recherche&Développement nous permettra de trouver des solutions indépendantes des ressources fossiles.

L'innovation technologique est donc à promouvoir, elle permet de faire avancer la recherche et d'ouvrir de nouveaux débouchés économiques.

Cependant, celle ci n'est pas toujours évidente car elle s'accompagne souvent de freins (coût plus élevé, prise de risque, temps consacré à l'expérimentation...).



©Windreport'

¹⁷⁹ Atelier Cap Vert, www.chantier-capvert.fr

Nuisances diverses (bruit, vagues...)

Sonores

Les principaux impacts du bruit se font surtout sentir sur les autres acteurs du milieu maritime.

Pour les bateaux de plaisance des études réalisées dans le cadre du projet de recherche SoundBoat ont démontré que près de 50% du bruit extérieur généré par un bateau de plaisance à moteur provient de la coque. Il serait intéressant de valoriser les architectes ayant réalisé des efforts sur la diminution des nuisances sonores issues de la coque ainsi que les efforts réalisés par les motoristes pour diminution de l'émission sonore de leur moteur¹⁸⁰.

Il est important de distinguer les sons émis dans l'atmosphère et les sons sous-marins émis par la coque, l'hélice et l'échappement des moteurs. Cependant peu de recherches ont été réalisées sur ce second point.

Il a été démontré que le niveau de bruit généré par les bateaux de plaisance est acceptable à proximité des zones résidentielles et de loisirs, en revanche ceux-ci sont trop élevés pour des parcs naturels ou zones protégées.

Pour les navires de commerce, de pêche et tous les bateaux employant un équipage, la directive européenne 2003/10/CE définit l'exposition maximale au bruit sur le lieu de travail des équipages. Cette directive s'appliquera en totalité aux équipages à partir de 2011. Elle prévoit que les risques résultant de l'exposition au bruit soient supprimés à leur source ou réduits au minimum en tenant compte du progrès technique et de la disponibilité de mesures de maîtrise du risque à la source.

A bord des navires les plus anciens, la gestion des accès aux espaces bruyants et l'utilisation de protection auriculaire sont les mesures les plus adaptées.

Création de vagues

Étant donné que la forme de la coque et le poids du bateau jouent un grand rôle quant à la taille de la vague de sillage, il serait envisageable de mesurer la taille des vagues produites par les embarcations de plaisance là où ces vagues causent des problèmes que ce soit à l'environnement naturel ou aux autres utilisateurs du plan d'eau tels kayakistes ou baigneurs.

Un des moyens les plus efficaces est de limiter la vitesse dans certaines zones sensibles.

Prendre en compte cet aspect rejoint les efforts nécessaires de dessiner des carènes qui trainent moins d'eau.

Accessibilité personnes à mobilité réduite

La prise en compte du handicap lors de la construction des navires est un critère important de l'éconavigation. En effet nous défendons la possibilité d'accès à la mer aux plus grand nombre.

Exemples de projet :

Handimar 580 : un bateau de plaisance pour personne à mobilité réduite développé par la société Courants d'Ouest située à Plouguerneau (Finistère)¹⁸¹.

Projet An Aocher¹⁸², construction d'un catamaran conçu spécialement pour permettre le transport d'une personne handicapée moteur, qui pourra le diriger seule. En deux voyages, l'un vers l'Europe septentrionale, l'autre vers la Méditerranée et l'Atlantique, ce projet a pour objectif de découvrir la vie des ports et du littoral en naviguant sur un catamaran écologique adapté à une personne handicapée physique afin de sensibiliser à un usage respectueux du milieu marin et d'informer sur l'accessibilité des structures portuaires aux personnes handicapées.



Projet An Aocher

¹⁸⁰ Guide écologique du nautisme sur le Saint-Laurent, Martin Savard, biologiste, 2000

¹⁸¹ Handimar 580, www.wiki-brest.net/index.php/Handimar

¹⁸² Projet An Aocher, www.an-aocher.com

Andi 27 : voilier monocoque de 8 mètres de long conçu pour accueillir un équipage de 5 personnes dont 3 à mobilité réduite en fauteuil qui pourront participer aux manœuvres de navigation. Le projet est mené avec le Centre nautique de Douarnenez, l'architecte naval Julien Marin, le lycée Ferdinand Fillod et les industriels locaux, le tout parrainé par Damien Seguin, champion olympique et multiple champion du monde handi-voile¹⁸³.

L'association Vent d'Ouest, créée en 2000, a pour objectif d'offrir la possibilité à tous de découvrir la voile et la liberté d'être en mer. Les deux bateaux situés à Morlaix et Brest (29) accueillent des personnes valides ou handicapées en difficulté ou réinsertion sociale. L'association Vents d'Ouest fait aujourd'hui voyager 600 personnes par an.



Andi 27 ; © DR

Projet Heol : le projet Heol porté par la compagnie « latitude 56 » et labellisé par le Pôle Mer Bretagne a pour objectif la fabrication d'un catamaran de 50 places, adapté à la navigation dans les espaces naturels sensibles et accessible aux personnes handicapées, prévu pour une navigation dans le Golfe du Morbihan.

Divers

Bateau à vocation pédagogique

Un bateau pédagogique permet de faire découvrir, d'observer, d'apprendre et de respecter la mer et son environnement. Grâce à ce genre d'action, il serait plus facile de réduire le problème de pollution à la source.

Multimono :

La **société Philonautic**¹⁸⁴ spécialisée en animation éducative nautique a créé et développé depuis 6 années un outil pédagogique qui permet de transmettre la passion de la construction et des activités nautiques : Le bateau Multimono a été produit en Kit Puzzle à 20 exemplaires. Sa conception a intégré une construction amateur accessible sans difficulté.

Sur l'eau, il est présent en Archipel France : Nouvelle Calédonie, Guadeloupe, Guyane, La Réunion et en métropole. La Commission Scolaire du Québec vient de passer la première commande et de développer un beau projet pédagogique.

En plus de cette démarche pédagogique la société Philonautic travaille à la réduction de l'impact environnemental de son bateau.



Multimono ; © Philonautic

¹⁸³ Andy 27, <http://andy27.free.fr/>

¹⁸⁴ SARL PHILONAUTIC, www.multimono.com

Intégration dans le paysage et la tradition

Même si ce critère semble rester abstrait, il nous semble important de privilégier les bateaux bien intégrés dans le paysage mais aussi ceux qui ont une vocation historique.

Exemples :

Voyageur Equivoent¹⁸⁵

Plusieurs initiatives caractérisent la construction de ce bac à voile (bateau traditionnel du bassin d'Arcachon) long de 12 mètres. Revu et aménagé avec les entreprises locales du métier, Le Voyageur Equivoent incarne, la possibilité de naviguer de manière éco-responsable, en préservant l'environnement. Le voyageur est construit en bois labellisé et possède un moteur hybride.

Bateaux du patrimoine maritime:

Au fil du temps, ce patrimoine maritime s'est constitué selon des critères de protection tenant à la représentativité d'un type de production, la rareté, l'innovation technologique, la référence historique et événementielle, la notoriété du ou des concepteurs.

Bateau n'utilisant pas les infrastructures portuaires

Aujourd'hui l'un des principaux problèmes auquel doit faire face la plaisance est le manque de place dans les ports. De nombreux chiffres sont évoqués : 60 000 places manquantes d'après la FFPP, 20 000 à 30 000 places manquantes d'après l'UNAN. Une chose est sûre, la demande de places est supérieure à l'offre. La création de nouveaux ports ou l'extension de ports existant entraînent une dégradation importante de l'environnement (impact sur la faune et la flore, consommation d'énergie et de matériaux...).

Il est intéressant de préciser qu'il y a actuellement 400 000 bateaux sur les 900 000 bateaux de plaisance en France qui sont stockés chez le particulier et qui utilisent majoritairement les cales de mise à l'eau.

Pour les petits bateaux, il semble important de privilégier ceux qui peuvent se passer d'infrastructures portuaires (stockage à terre, facilité de transport, échouage simplifié dans des zones adaptées...). Cependant il faut attention à l'impact environnemental généré par ce transport. Cet argument peut être valable pour les bateaux stockés à proximité du plan d'eau ou ceux ne sortant qu'exceptionnellement.

L'Heol 7.4¹⁸⁶, conçu et fabriqué par la société Heol Sailing, permet de s'échouer facilement. En effet, le bateau est équipé de deux quilles relevables hydrauliquement, à l'aide d'une télécommande électrique. Les deux quilles à bulbe descendent à 1,90 m et se remontent en 30 secondes pour ne donner que 60 cm de tirant d'eau.



Heol 7.4 ; © Heol Sailing

Dans le même esprit, citons l'association « Voile-Aviron » et les plaisanciers qui optent pour un bateau type dériveur intégral.

¹⁸⁵ Voyageur Equivoent, Association Agir ou Subir, <http://agirousubir.blogspot.com/equivoent/>

¹⁸⁶ Société Heol Sailing : <http://www.heolsailing.com>

Conclusion

Comme nous avons pu le voir, tout au long de ce rapport, de plus en plus d'acteurs du milieu maritime s'intéressent à l'éconavigation. Que ce soit à travers des projets de recherche ou déjà à travers des offres concrètes sur le marché, les projets allant dans le sens d'une navigation durable se multiplient. Il est aujourd'hui nécessaire de valoriser et d'augmenter la visibilité de ces initiatives. C'est ce à quoi le réseau EcoNav s'attèle.

Ce cahier technique n'est qu'une partie du travail réalisé par EcoNav en vue d'un label de l'éconavigation sur le thème « Bateau et Equipements ».

En parallèle, nous avons établi avec le groupe de travail, une première grille d'analyse et d'évaluation du caractère éconautique d'un bateau équipé.

Le concept général de cet outil d'analyse et son applicabilité ont été validés sur quelques cas d'étude choisis : plusieurs bateaux équipés « types » ont été évalués à titre expérimental d'après les critères de la grille.

Les résultats sont satisfaisants, mais l'outil doit encore être affiné et sa pertinence renforcée. Il faut également travailler sur son adaptation en fonction du type de bateau et du programme de navigation.

L'un des objectifs fixés pour la prochaine étape (2011) est donc de proposer une version plus aboutie de grille d'analyse et d'évaluation du caractère éconautique d'un bateau équipé en s'appuyant sur des résultats concrets obtenus sur des bateaux tests.

Nous souhaitons, à partir de ce cahier technique et de cette grille d'évaluation, valoriser les alternatives allant dans le sens de l'éconavigation à travers un processus de cahier des charges et de certification indépendante couplée à un label (sorti prévue en 2012). Des campagnes de sensibilisation et de formation pour les différents acteurs sont prévues pour accompagner cette démarche.

Pour arriver à un label opérationnel pour 2012 nous allons approfondir le travail avec nos différents partenaires dont notamment les constructeurs et équipementiers, les agences de l'état, les collectivités et les fédérations pour faire de cette démarche, un label reconnu par tous.

Nous nous rapprocherons également des institutions publiques, des responsables de ports et des compagnies d'assurances pour identifier et négocier les avantages que pourra apporter ce futur label aux usagers et aux chantiers.

L'objectif est clairement, à travers cette démarche, de créer une dynamique vertueuse dans les filières nautiques et navales et dans le cœur des « gens de mer ».

Notre démarche de cahier des charges est une démarche ouverte à tous. Vous souhaitez obtenir davantage d'informations sur notre démarche, présenter votre projet, participer aux discussions du groupe de travail, n'hésitez pas à nous contacter aux coordonnées ci-dessous.

Bertrand Jaouen, responsable du projet cahier des charges, 02.98.75.31.86 ; bertrand@econav.org

Hervé La Prairie, initiateur du projet et président d'EcoNav, 02.98.75.31.86 ; hervelaprairie@free.fr

Droits d'auteurs

Ce document a été déposé auprès de la Société des Auteurs Compositeurs Dramatiques. Toutes reproductions même partielles, sous une autre forme, sous un autre format, sans autorisation préalable, s'exposent à l'application des droits sur la propriété intellectuelle.

Les photos, dessins, textes, tableaux, etc, pour lesquels aucun crédit n'est spécifié sont réputés être la propriété du réseau EcoNav et ne peuvent être reproduit sans permission.

Les photos ou textes pour lesquels un auteur est mentionné restent la propriété de l'auteur. L'utilisation de ce travail dans ce rapport a été autorisée, ou la licence permettait sa reproduction.



Voyageur Equivovent ; © Agir ou Subir



Cahier technique de l'éconavigation
Volet 1
« Bateaux et Equipements »

Décembre 2010



Annexes

Annexe 1 :

Groupe de travail et personnes ressources « Bateaux et Equipements »II

Annexe 2 :

Etat d'avancement du volet «Pratiques et Comportements » et « Ports et Abris »III

Annexe 3 :

Etat des lieux des différents secteurs maritimes V

Annexe 4:

Etude du rendement énergétique de deux chaînes de propulsionX

Annexe 5:

Exemple de projets et d'organismes répertoriés dans ce cahier techniqueXII

Annexe 1 : **Groupe de travail et personnes ressources « Bateaux et Equipements »**

Les participants à ce groupe de travail sont les suivants :

Pilotes :

- **Bertrand Jaouen**, chargé de mission, De Navigatio, EcoNav
- **Hervé la Prairie**, Coordinateur du réseau EcoNav

Membres du groupe de travail :

- **Gwénael le Maguer**, Ingénieur Transfert Nautisme & Construction Navale à l'Université de Bretagne Sud
- **Nicolas Vivier**, Icarai, Construction bateau bois
- **Jacques Dussol**, Breizelec Mantagua, concepteur et fabricant d'éclairage L.E.D.
- **P-Y Glorennec**, Avel Vor Technologie (AVT)
- **Christian Cavé**, Expert maritime
- **Yannick Wileveau**, Société Naviwatt
- **Pierre Jean Jannin**, Cadre commercial
- **Stéphane Lecointe**, ADEME Bretagne
- **Dominique Praz**, USHIP
- **Benoit Calvet**, Association « Agir ou Subir »
- **Sandra Boisdevesy**, Chantier naval Dubourdieu
- **Anne Lavalette** Chantier naval Dubourdieu

Personnes ressources :

- **Yves Guignot**, professeur de l'enseignement maritime, Ecole de la Marine Marchande de Nantes
- **Guy Béraudière**, Dépollution Nautique, déconstruction et dépollution des Bateaux de Plaisance en Fin de Vie
- **Séverine Farrugia**, Comité des pêches Bretagne
- **Fabrice Guesdon**, Technopole Cherbourg-Normandie
- **Christophe Avellan**, Pôle MER PACA
- **Hakim Rahmoun**, Olbia chantier Naval
- **Patrice Passinge**, Meta chantier naval
- Autres personnes ressources citées dans le rapport

Annexe 2 : Etat d'avancement du volet «Pratiques et Comportements » et « Ports et Abris »

Description du Volet « Pratiques et Comportements »

Dans le cadre de cette démarche le réseau EcoNav a décidé de mettre également en place un groupe de travail autour de la thématique « pratiques et comportements dans les activités maritimes à terre et en mer ». Ce projet a pour objectif de créer un véritable dialogue entre les différents acteurs, de créer un réseau de compétence, d'augmenter la lisibilité des projets existants et de réfléchir aux projets collaboratifs qu'il serait possible de mettre en place. Notre objectif n'est en aucun cas de refaire ce qui a déjà été réalisé mais d'aller plus loin dans la réflexion en mettant autour de la table les acteurs des différents secteurs maritimes.

Un groupe de travail, piloté par deux de nos membres, l'association Voile de Neptune et la Fondation Nicolas Hulot et supervisé par le réseau EcoNav, a été constitué en début d'année 2010.

A travers cette démarche nous voulons informer, échanger, conseiller et surtout donner de la lisibilité aux différents acteurs et usagers du milieu maritime sur les différentes pratiques et comportements respectueux de l'environnement.

Nous souhaitons créer un ou plusieurs réseaux de compétence à portée régionale et nationale afin d'approfondir le travail réalisé en mettant autour de la table les différents acteurs du milieu maritime.

Nous avons également travaillé à la réalisation d'un état des lieux des réflexions, des projets et des acteurs travaillant sur la problématique « Pratiques et comportements dans les activités maritimes à terre et en mer ». Une synthèse de cette étude est disponible sur le site internet EcoNav et chacun de ces projets est géolocalisé. Vous êtes porteur, créateur, et/ou acteur d'un projet de sensibilisation ou avez connaissance de l'existence d'une telle démarche, n'hésitez pas à nous la faire connaître en remplissant la fiche inventaire disponible sur le site.

En collaboration avec la Macif Centre de voile, nous souhaitons développer la discussion et les actions de terrain autour de la prise en compte de l'environnement dans la gestion des centres d'apprentissage d'activités nautiques.

Des initiatives comme la copropriété, la location, la connaissance et le respect de la faune et de la flore, les achats responsables, les comportements éco-citoyens... sont autant de thèmes qui devront être abordés et pris en compte par les usagers.



Description du volet « Ports et Abris »

Dans l'objectif d'avoir une approche complète de l'éconavigation, nous nous intéressons également à la thématique des ports et abris. Les impacts générés par les activités portuaires que ce soit dans le milieu de la plaisance de la pêche ou de la marine marchande ne sont pas négligeables. Depuis quelques années nous observons une prise de conscience avec l'apparition de nombreuses démarches environnementales (EcoPorts, Ports Propres, Norme AFNOR, démarche QSE, Pavillon Bleu, Ports Exemplaires...)

Dans un premier temps, le réseau EcoNav a réalisé un état des lieux des différents acteurs et alternatives allant dans le sens d'une navigation durable et de fait partager les valeurs de l'éconavigation en participant à différents réseaux existants.

EcoNav reconnaît les avancées des différentes démarches environnementales mais souhaite aller plus loin dans le développement durable et de manière plus collective.

Nous appuierons toute action allant dans ce sens. Cependant en l'absence d'initiative de regroupement et d'approfondissement, nous proposerons une dynamique semblable au volet « Bateaux et Equipements ».



Annexe 3 : **Etat des lieux des différents secteurs maritimes**

Plaisance

Le nombre de plaisanciers atteint aujourd'hui 4 millions et les immatriculations de bateaux de plaisance augmentent d'environ 25 000 unités par an. Sur le littoral, près de 500 installations portuaires sont destinées à l'accueil des navires de plaisance et en eaux intérieures, nous dénombrons 8 500 km de voies d'eau et d'innombrables lacs ou plans d'eau ouverts à la navigation de plaisance¹⁸⁷.

Le secteur économique de la plaisance se caractérise par son dynamisme et par l'extrême diversité des produits proposés : voiliers et navires à moteur de tailles et caractéristiques très différentes, mais également voile légère ou sportive, ensemble des services (équipementiers, loueurs, ports de plaisance), sans omettre toutes les innovations ainsi que le développement de nouvelles formes de loisirs.

La navigation de plaisance en mer représente une flotte d'environ 923 506 unités (au 31 août 2009 hors DOM-TOM) :
75% sont des navires à moteur,
72,5% sont des navires d'une taille inférieure à 6 mètres.

La filière nautique

La filière nautique avec ses composantes - production, distribution, services - regroupe 4 900 entreprises, génère un chiffre d'affaires de 4,16 milliards d'euros et compte plus de 45 000 emplois en 2007.

La France est le second constructeur mondial de bateaux de plaisance et le 1^{er} en Europe (1^{er} rang mondial pour la construction de voiliers avec le groupe Bénéteau-Jeanneau).

Plus de 63% de la production est destinée à l'exportation, essentiellement vers l'Allemagne, le Royaume-Uni, l'Espagne et l'Italie pour les pays de l'Union européenne, et vers les Etats-Unis.

Principaux constructeurs : Groupe Bénéteau-Jeanneau, Dufour et Sparks, Fontaine Pajot, Guy Couach, Catana, Hamel.

Les ports de plaisance

Nous dénombrons environ 470 ports et installations de plaisance en mer pour l'accueil des navires et une cinquantaine de ports et haltes fluviales regroupées principalement dans la fédération française des ports de plaisance (FFPP). Ces installations correspondent à environ 165 000 places recensées.

A ce parc, il convient d'ajouter les mouillages individuels ou collectifs hors ports, le long du littoral, le plus souvent dans des estuaires abrités

Statistiques / profil du plaisancier

Le nombre de plaisanciers est estimé à 4 millions.

Seule une minorité des adeptes de la navigation de plaisance est propriétaire d'un bateau (37%), la plupart préférant l'emprunter (62%), se faire inviter ou le louer (22%), selon une étude d'Odit France publiée début décembre 2008¹⁸⁸.



¹⁸⁷ Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer, <http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Plaisance-et-loisirs-nautiques,1527-.html>

Profil des plaisanciers

Cette même étude confirme aussi que les plaisanciers, majoritairement des hommes et des retraités, ont des "revenus supérieurs à la moyenne". Ils sont 36% à être ou avoir été cadres ou chefs d'entreprise (contre 15% dans la population française). La totalité des plaisanciers interrogés jugent que la sécurité est un critère important, tandis qu'ils sont une grande majorité (83%) à penser que le prix est important.

Critère d'achat

En revanche, si l'environnement fait l'objet d'un intérêt "de principe", "le facteur environnemental ne conditionne ni le choix du bateau ni les attentes en matière d'évolutions nécessaires des ports", estiment les auteurs de l'étude.

L'étude souligne que l'obtention d'une place de port reste un sujet de préoccupation : pour 75% des plaisanciers, il existe une relation entre la perspective d'obtenir une place et l'achat d'un bateau. Il y aurait en France un déficit de 55.000 places dans les ports français, ce qui contribue à freiner les ventes, selon les professionnels.

L'étude montre aussi que les plaisanciers ne sont majoritairement pas disposés à payer plus pour améliorer la qualité de l'accueil dans les ports. L'enquête a été réalisée d'avril à juin 2008 auprès d'un échantillon de 800 plaisanciers navigant sur des bateaux mesurant entre 5 et 24 mètres.

Remarque :

La **puissance des moteurs** des navires de plaisance a augmenté de façon significative de 1992 à 2007 pour de multiples raisons, dont les principales sont les suivantes¹⁸⁹ :

- la population des propriétaires a glissé vers des catégories plus aisées, pour lesquelles, comme pour l'automobile, l'augmentation de puissance est à la fois un gage de confort et un signe de réussite ;
- les performances des moteurs diesel ont augmenté, à poids et encombrement égal, grâce à la généralisation des turbocompresseurs ;
- l'augmentation de la puissance est un gage de sécurité, en particulier lors des manœuvres de port, et pour les voiliers lors des navigations sans vent ou contre le vent et la mer ;
- les moteurs hors bord *propres* (moteur à quatre temps ou à injection), avec une consommation de 20 à 30 % inférieure, se sont imposés tant en première monte (équipés en usine) qu'en remplacement des moteurs existants.

¹⁸⁸ ODIT France, Le marché de la plaisance en France - Mieux comprendre les pratiques, les besoins et les attentes des plaisanciers, décembre 2008

¹⁸⁹ Conseil Supérieur de la Navigation de Plaisance et des Sports Nautiques (CSNPSN), Nautisme et Environnement – Avis et Rapport *Impact de la Pratique du Nautisme*

Navires de commerce

Le transport maritime est depuis très longtemps mondialisé. L'Organisation Maritime Internationale (OMI) et ses 169 Etats membres, créée en 1948 et installée à Londres, en est l'illustration.

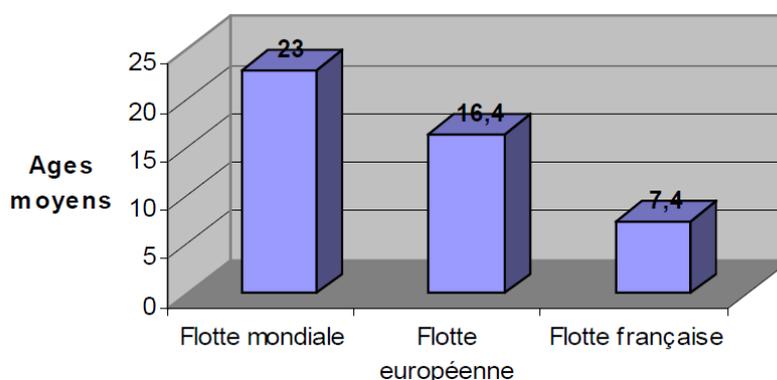
Dans ce contexte, la flotte de commerce se caractérise par sa très grande volatilité. Un navire durant son exploitation peut changer de propriétaire, de pavillon et de société de classification en quelques heures.

Environ 7 milliards de tonnes de marchandises sont transportées chaque année par la mer. Entre 45 000 et 60 000 navires (en fonction de la taille minimale prise en compte) composent la flotte mondiale. Le transport maritime assure environ 90% du trafic mondial de marchandises¹⁹⁰.



©DR

L'âge moyen de la flotte mondiale est de 23 ans, alors que la flotte française est l'une des plus jeunes avec 7,4 ans. La flotte européenne a quant à elle une moyenne d'âge de 16,4 ans.



La flotte de commerce sous pavillon français compte, au 1^{er} janvier 2010, 216 navires de plus de 100 unités de jauge brute dédiés aux transports. Toutes activités et tonnages confondus, cette flotte rassemble près de 5400 navires (avitailleurs, plateformes, navires de recherche, exploration, câbliers, remorqueurs, yachts utilisés à des fins commerciales, vedettes diverses, dont 2 947 petits navires dédiés aux services publics.). 298 navires sont immatriculés au Registre International Français (RIF).

Les navires dédiés aux transports totalisent près de 6,4 millions d'unités de jauge brute et leur capacité d'export est de près de 8,5 millions de tonnes de port en lourd.

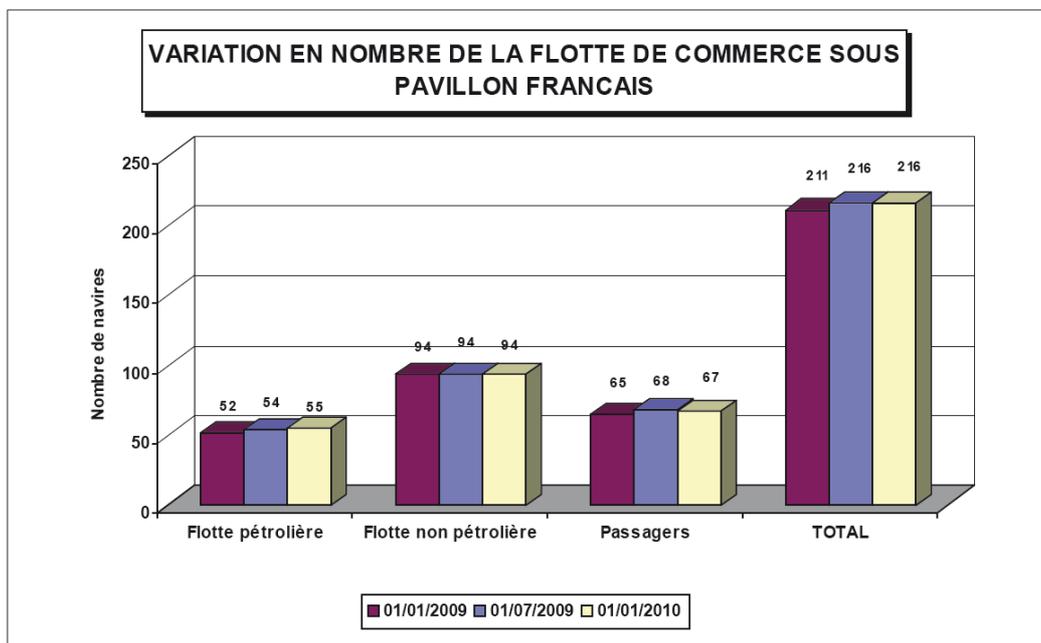
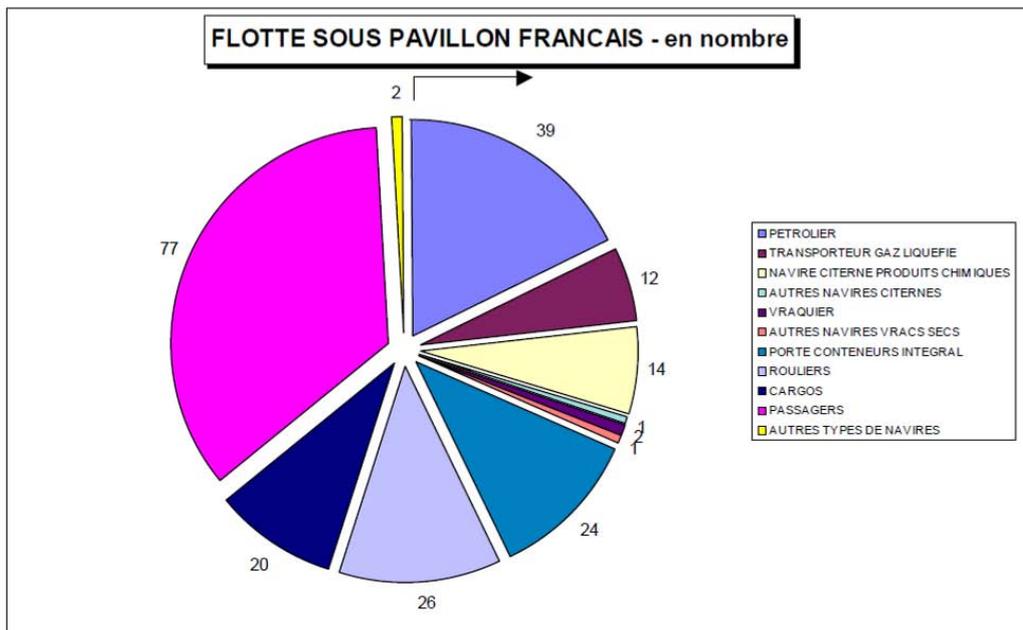
Répartie selon les registres d'immatriculation, la flotte française comprend 99 navires de transport de plus de 100 unités de jauge brute inscrits au Registre International Français (RIF), 73 navires au registre métropolitain et 44 navires aux registres d'Outre-mer, dont 29 en Polynésie Française.

L'âge moyen de la flotte française se stabilise à 7,4 ans au 1^{er} janvier 2010, contre 6,8 ans un an auparavant.

La flotte française s'avère ainsi de 8,2 ans plus récente que la flotte mondiale (15,6 ans) et de 5,3 ans plus jeune que celle de l'Union Européenne (12,7 ans) (Sources ISL- juillet 2009). Quatre des cinq navires entrés en flotte

¹⁹⁰ Grenelle de la Mer, Mission parlementaire « démantèlement des navires », rapport final juin 2010

au cours du second semestre 2009 sont neufs, le cinquième avec ses 37 ans explique la remontée de la moyenne. Pour les quatre sorties de flotte, l'âge des navires est de 9 ans pour les deux CMA et de 26 et 32 ans pour les deux autres¹⁹¹.



¹⁹¹ Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer, <http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Secteur-Maritime-et-Fluvial,1498-.html>

Navires de pêche

Avec quelques 7 400 navires immatriculés en 2009, la flotte française représente environ 9% de la flotte européenne, 11 % du tonnage et 10 % de la puissance de la flotte européenne. Ces chiffres incluent les navires immatriculés dans les départements français d'outre-mer («DOM»), régis par des règles différentes de celles applicables à la flotte communautaire en général (régime entrée/sortie). Les navires vont des petites unités côtières aux navires pélagiques et senneurs de haute mer mesurant 50 mètres et davantage. La flotte de petite pêche côtière, composée de navires d'une longueur inférieure à 12 mètres, représente plus de 80 % de la flotte de pêche française en nombre de navires. Tandis que les navires de plus de 25m ne représentent que 1% de la flotte. Sur 30 % des navires français, les principaux engins de pêche sont des casiers, puis des filets maillants fixes (18 %) et des chaluts de fond à panneaux (16 %) ¹⁹².

En 2008 la France se situait au 4^{ème} rang communautaire en volume de captures, poissons, crustacés, mollusques et algues avec environ 550 000 tonnes débarquées par les navires français métropolitains.

La répartition par tranches d'âges entre la métropole et les territoires d'outre mer est la suivante ¹⁹³ :

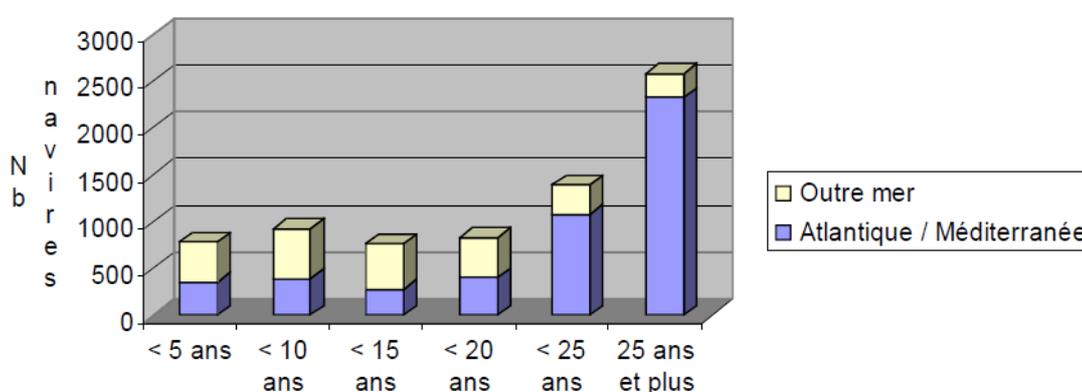


Figure 7: Répartition géographique par tranches d'âges

Il est important de signaler que 66% des navires ont plus de 20 ans, soit près de 4816 navires.

Navires fluviaux

La flotte fluviale doit être décomposée en sous ensembles : marchandises, passagers et plaisance, location ¹⁹⁴. Chacune de ces catégories présente une configuration très particulière.

La flotte fluviale de marchandises est la flotte la plus âgée avec 42 ans. La flotte française est constituée de 1369 unités de relativement faible capacité, en moyenne 800 tonnes contre 1000 tonnes pour la flotte européenne.

Le nombre de bateaux fluviaux à passagers est d'environ 500 unités, dont la moyenne d'âge est de 20 ans. Il s'agit dans ce cas d'une flotte récente dont la tendance est au renouvellement.

La flotte fluviale française de bateaux de plaisance est composée d'environ 1500 unités, et dispose d'un taux de renouvellement très élevé (24% en 5 ans).

¹⁹² Commission européenne Affaires maritimes et pêche : La politique commune de la pêche en chiffres, édition 2010

¹⁹³ Grenelle de la Mer, Mission parlementaire « démantèlement des navires », rapport provisoire juin 2010

¹⁹⁴ Grenelle de la Mer, Mission parlementaire « démantèlement des navires », rapport provisoire juin 2010

Annexe 4: **Etude du rendement énergétique de deux chaînes de propulsion**

A travers l'exemple ci-dessous, nous voulons montrer l'importance de bien choisir son type de propulsion et sa source d'énergie en fonction de son programme de navigation afin d'éviter toute surconsommation d'énergie. Pour cela nous avons comparé le rendement énergétique de 2 chaînes de propulsion :

- Le premier cas correspond à une chaîne de propulsion composée d'un moteur thermique qui entraîne directement l'arbre d'hélice
- Le deuxième cas correspond à une chaîne de propulsion hybride thermique-électrique. Nous nous placerons dans le cas où l'électricité est produite à partir d'un alternateur entraîné par un moteur diesel couplé à une hélice. Cette électricité est ensuite utilisée pour la charge des batteries dont le courant va servir à alimenter un moteur électrique qui entraînera à son tour l'arbre d'hélice quand le diesel sera à l'arrêt.

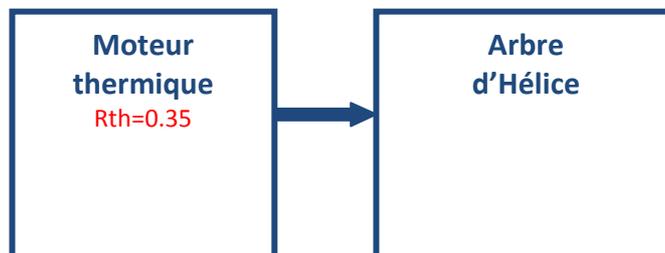
Ces données sont des données approximatives. Celles-ci sont variables selon les sources, la taille du navire et les différents modèles présents sur le marché. L'objectif n'est pas de donner une valeur précise mais un ordre de grandeur pour susciter la discussion.

Cas n°1 : Le moteur thermique alimente en direct l'arbre d'hélice

R_{th} = Rendement moyen d'un moteur thermique = 0.35

R_1 = Rendement de la première chaîne de propulsion étudiée

Nous ne tenons pas compte du rendement de l'arbre d'hélice car nous considérons qu'il est le même dans les deux cas étudiés.



$R_1 = 0.35$

Pour cette première chaîne de propulsion, nous arrivons à un rendement énergétique final de 0.35.

Cas n°2 : Moteur électrique alimente l'arbre d'hélice et les batteries sont chargées par un alternateur entrainé par le moteur thermique

R_{th} = Rendement moyen d'un moteur thermique = 0.35

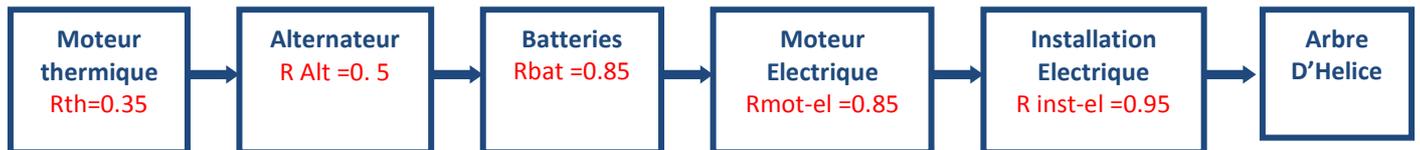
R_{Alt} = rendement moyen d'un alternateur à plein régime = 0.5

R_{bat} = Rendement moyen des batteries au plomb = 0.85

R_{mot-el} = Rendement moyen d'un moteur électrique = 0.85

$R_{inst-el}$ = Rendement moyen d'une installation électrique (cablage...) = 0.95

R_2 = rendement de la deuxième chaine de propulsion étudiée



$R_2 = 0.12$

Pour cette deuxième chaine de propulsion, nous arrivons donc à un rendement énergétique final de 0.12.

Bilan de cette étude :

Au final que nous rendons compte que le rendement de la chaine de propulsion 1 est bien supérieur au rendement de la chaine de propulsion 2.

Lorsque nous nous intéressons au rendement global de la chaine de propulsion, et de la consommation électrique, nous nous rendons compte que, d'un point de vue consommation d'énergie, le recours à la propulsion électrique, en utilisant un alternateur pour charger les batteries, n'est pas toujours pertinent vis-à-vis d'une propulsion thermique « classique ». **Il est donc essentiel de s'interroger sur le mode de production de l'électricité que nous utilisons.**

Annexe 5:
Exemple de projets et d'organismes répertoriés dans ce cahier technique

Dragonkraft	19
Sicomini	19
NavEcoMat	20
Chantier Grand Lague Composites	20
ID COMPOSITE	20
Projet Tara Tari	20
RTM éco	26
Procédé BMT	38
Projet BELEAF	48
Projet Bulbe	53
Projet OPTNAV	54
STX Europe	57
Chantier naval Esterel	57
Chantier naval Dubourdiou 1800	59
Icarai	60
STX France	60
Concept ECOSHIP	61
Société Quantis	61
Projet CONVENAV	61
Outil SSD « Sustainable Ship Design »	62
Société EVEA	62
Société CTMV	64
Projet Transport Cohérence	64
727 Sailbags	65
Karver	65
Projet SAFEOL	71
Projet Agrogasoil	71
Eoseas	71
Tidekongen	71
E-Max	71
Le Zéphir	76
Aequus 7.0	76
Société Babord	76
Gamme Hydroxy	76
Remora	76
Bosco	76

Kräutler	76
Torqueedo	76
Propelec	76
Emotor	76
Minn Kota	76
Energy Boat	76
Riverquest	79
Bateau de servitude « Ile Tristan »	79
Projet Grand Lague	80
Projet HALIEU KITE	81
Société Aerosea	81
Projet Windship	81
Projet Skysails	81
Cerf-volant Omegasails	81
L'Ecotroll	82
Projet Ecoship	82
Projet Enviropax	83
Projet SODENA	84
Programme Ecomer	84
Projet ECO-SECURITE	84
Projet EONAV	84
E-Ship 1	85
SUNTORY MERMAID 2	86
Ferry Boat de Marseille	88
La Péniche Soleil d'Oc	88
Le projet PLANETSOLAR	88
Le Photon V	89
Solar Odyssey	89
L'association Concept Hélios Propulsion	89
Hydrogénérateurs Watt&Sea	91
Projet zéro CO ₂	94
H2 Nemo	94
Projet « Methapu »	95
Projet « FellowSHIP »	95
Projet Casapac	95
Association française de l'hydrogène	95
Entreprise allemande EFOY	95
Acta Energy	95
Watteo	95
Breizelec	97

EOLED	97
Tacktick	98
Projet EFFICHALUT	99
Projet MERITA	99
ODC Marine.....	105
Système EcoNab.....	113
Projet HYCARE.....	114
Prix Bateau bleu 2009	117
Société Deerberg Systems.....	118
Hempel Hempaxil X3	122
Ecosil	123
Seawax Marine Coatings	123
Oceoprotec.....	123
Procédé BoatSonic	124
Projet Paint Clean.....	124
Ecopaint PACA.....	124
Biopaintrop	124
Antifouling à base de nacre : projet Pearling	124
Gamme EcoVer	127
Océan respect (Uship)	127
Matt Chem	127
Green Plaisance.....	127
L’ancr-éco.....	129
Nautiscaphe	130
Association Genêts d’Or.....	137
Kroc’Boat.....	137
Société «Dépollution Déconstruction Nautiques Recyclage	137
APER.....	138
Handimar 580.....	144
Projet An Aocher	144
Association Vent d’Ouest	145
Projet Heol	145
Multimono	145
Voyageur Equinovent.....	146
L’Heol 7.4	146