

Feuille de Route GreenShip

« Décarbonation et navires écologiques »

Révision 2021

- Pilote : Chantiers de l'Atlantique – Laurent Rouxel Duval/ Thomas Etesse
- Co-pilote : Pôle Mer Bretagne Atlantique – Frédéric Ravilly
- Coordination : Comité R&D

**CHANTIERS
DE L'ATLANTIQUE**



Contenu

I.	Enjeux du Green ship pour la filière des industriels de la Mer :	2
II.	Objectif de la Feuille de Route « Green Ship » :	3
III.	La réduction des émissions en GES de l'énergie consommée	6
A.	Énergie stockée neutre en carbone ou décarbonée	6
1.	Remplacer le Heavy Fuel Oil	6
2.	Les différentes molécules alternatives	6
3.	Les systèmes propulsifs utilisant une énergie transformée	7
4.	Soutage et Stockage	9
5.	Sécurité et robustesse	9
B.	Les systèmes propulsifs utilisant une énergie renouvelable à bord	10
1.	Propulsion vélique	10
2.	Autres sources d'énergie renouvelable	11
3.	Production d'énergie à bord	12
C.	Hybridation	12
D.	Electrification à quai	12
E.	Traitement des émissions et polluants	13
1.	Capture et stockage de CO2	13
2.	Réduction des fuites de méthane	13
3.	Traitement des émissions et polluants	13
IV.	Efficacité Énergétique	14
A.	Design Optimal et technologies	14
1.	Réduction de la consommation énergétique	14
2.	Conception des navires	14

3.	Récupération et gestion optimisée de l'énergie	15
B.	Excellence Opérationnelle	15
1.	Opération des navires	15
2.	Formation	16
V.	Sobriété	16
VI.	Mutation de la flotte existante	17
A.	Refit / MCO.....	17
VII.	De l'Eco-conception au démantèlement	17
A.	Analyse du cycle de vie	18
B.	Limitation de l'empreinte environnementale dès la de phase de conception.....	18
C.	Fin de vie des navires	18
VIII.	Enjeux socio-économiques	19
IX.	Cible de réduction d'émission de gaz à effet de serre.	19
X.	Pilotage, mise en œuvre et indicateurs de performance	22
1.	Pilotage / Mise en Œuvre	22
2.	Calendrier	22
3.	Indicateurs de performance	24

Remerciements

Cette Feuille de route a été élaborée en collaboration avec plusieurs industriels (Chantiers de l'Atlantique / Bénéteau / Bureau Veritas / Beyond the Sea / CNIM / Naval Group / Esprit de Velox / NEOLINE) et des réseaux professionnels (Pole Mer Bretagne Atlantique et Méditerranée / France Hydrogène / Windship / GICAN). Merci à tous ces acteurs pour leur implication et leurs contributions. Enfin cette feuille de route a également été largement travaillée en collaboration avec l'initiation de la coalition pour la transition éco-énergétique du maritime (T2EM) menée par le Cluster Maritime Français.

I. Enjeux du Green ship pour la filière des industriels de la Mer :

La gestion de l'impact environnemental des activités humaines est l'enjeu majeur du XXIème Siècle. Le secteur maritime, comme tous les secteurs économiques, y est confronté sur l'ensemble de sa chaîne de la valeur : conception, exploitation et maintenance jusqu'à la déconstruction des navires. La réduction des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) et de polluants depuis la construction des navires jusqu'à leur démantèlement aussi bien sous forme de rejets gazeux (Particules fines, NOX, SOX, ..), liquides (eaux grises, eaux noires) ou solides (optimisation des déchets dans les chantiers et déconstruction des navires) est le défi lancé à la filière des industriels de la mer.

La flotte mondiale représente environ 90 000 navires. Le transport maritime représente à ce jour moins de 3% des émissions mondiales de gaz à effet de serre et environ 1000 Mt de CO2 émises annuellement. L'enjeu de réduction est donc majeur. A ce jour, l'objectif fixé par l'Organisation Maritime Internationale (OMI) est de réduire de 50 % d'ici à 2050 les émissions de GES du transport maritime par rapport au niveau d'émissions de GES de 2008, et ceci dans un contexte où la flotte existante est constituée en majorité de navires construits sans tenir compte de ces objectifs. Le Green Deal européen envisage de réduire de 90% les émissions de GES liées au transport à horizon 2050 avec en outre l'ambition de réduire les émissions de GES de 55% d'ici 2030 incarnée par le paquet législatif européen « *Fit for 55* ».

Au-delà de la contrainte réglementaire, la pression sociétale est telle qu'aujourd'hui les « clients » du secteur maritime (depuis le particulier qui consomme du poisson, jusqu'aux plus grands groupes mondiaux comme Coca Cola ou IKEA, eux-mêmes poussés par leurs propres clients) mettent la pression sur les acteurs du maritime pour qu'ils réduisent leurs émissions.

Compte tenu de la flotte existante et des durées de vie habituelles des navires (20 à 40 ans et plus), cela impose que la filière française soit en capacité le plus rapidement possible de produire des Navires Zéro Emission ainsi que de proposer des solutions de réduction à la flotte existante. Sa capacité à offrir ce type de produits innovants dans tous les secteurs de marché est le gage de sa pérennité à terme dans un contexte concurrentiel d'autant plus exacerbé. Au-delà de la marine professionnelle, cette nécessité va aussi concerner à terme la marine de loisir, et donc toute la filière maritime nationale.

D'ores et déjà les obligations réglementaires deviennent contraignantes pour la marine de travail non seulement pour les navires neufs (EEDI) mais aussi pour les navires existants (Mesures adoptées en juin 2021 pour une application en 2023). En effet, validés par l'OMI, l'indice EEXI et le facteur CII d'intensité carbone devraient concerner près de 30 000 navires déjà en flotte avec des solutions techniques à trouver rapidement, sous peine de perte d'autorisation de naviguer à partir de 2023 (Il existe toutefois une autorisation de non-conformité pendant deux années consécutives). A ce jour près de 70 % des navires concernés ne sont pas conformes à cette règle.

De plus les réglementations locales (typiquement les zones NECA et SECA) devraient s'étendre et se sévérer (ex. fjords norvégiens « zéro polluant et zéro carbone » dès 2026). Il y a donc urgence à transformer le besoin énergétique des navires vers le zéro émission.

La filière décide donc de développer des solutions décarbonées d'ici 2030 sur tout type de navire construit en France.

Elle envisage **en outre un déploiement rapide de navires zéro émission à partir de petits navires (<50m et <3MW)** à compter de 2025 y compris des navires retrofités.

L'objectif final est **un déploiement de la flotte zéro émission à 2050.**

Les atouts français sont majeurs dans ce contexte et ces contraintes réglementaires mondiales et européennes sont une opportunité pour la filière pour plusieurs raisons :

- Permettre à la France et à l'Europe (via Waterborne) de prendre un **leadership mondial sur le sujet du navire zéro émission**

- **Développer une production d'équipements de propulsion décarbonée** en France et couvrir un marché mondial
- **Relocaliser des constructions neuves ou du refit** aujourd'hui surtout réalisées en Asie, les navires zéro émission pouvant être beaucoup plus technologiques
- **Pérenniser les emplois et développer de nouveaux emplois** sur le territoire grâce à cette transition écologique et énergétique.
- Assurer la **souveraineté nationale** en termes de mobilité maritime en particulier en croisant les usages maritimes avec une production nationale d'énergies renouvelables et/ou de carburants neutres en carbone ou zéro émission.

II. Objectif de la Feuille de Route « Green Ship » :

Le développement de navires neutres environnementalement et viables économiquement est l'objectif que se fixe la filière à travers cette feuille de route « GreenShip » (navire écologique). Les experts réunis dans le cadre de cette feuille de route ont consolidé un plan de développement de cette priorité à un horizon de 10 ans et identifié les verrous à lever pour atteindre cet objectif.

La réduction de l'émission des Gaz à Effet de Serre (GES) passera par trois grands axes qui sont :

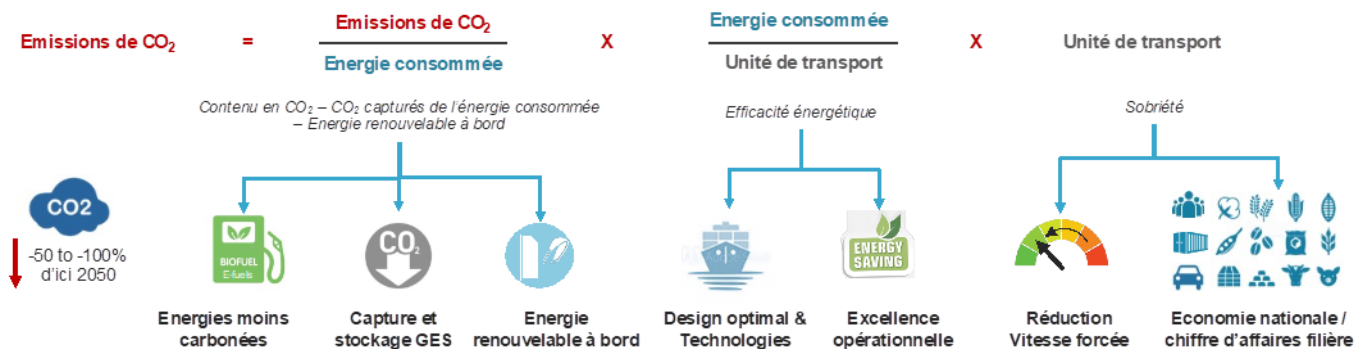
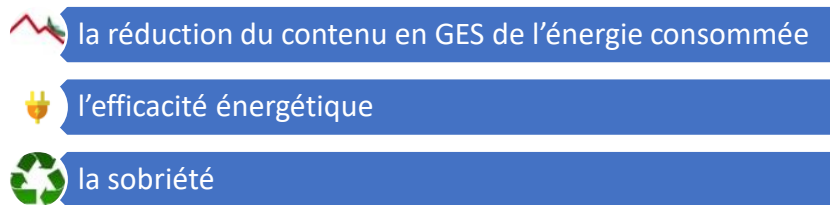


Figure 1 : Principaux axes pour la stratégie Green Ship (© Projet IT2EM)

Le Schéma ci-dessus (cf. Figure 1) présente ces éléments qui dérivent de l'égalité de Kaya appliquée au domaine maritime. La feuille de route proposée se décline autour de ces 3 axes dans les sujets principaux suivants :

- L'Energie renouvelable à bord, qui est le moyen d'utiliser directement sur le navire l'énergie renouvelable qu'est le vent et dans une moindre mesure l'énergie solaire ou mécanique issue des mouvements du navire.
- Energie moins carbonée, qui concerne l'utilisation de bio-carburants ou E-carburant produit à partir d'électricité verte.
- Capture et stockage de GES, qui vise à capter les GES à la sortie de la combustion réalisée sur le navire

- Le Design optimal et l'usage de technologies offrant une meilleure efficacité énergétique, qui doit permettre de réduire la consommation d'énergie des navires neufs et des navires en exploitation, après retrofit
- L'excellence Opérationnelle, qui recouvre les gains qu'il est possible de réaliser lors de l'usage des navires à travers une meilleure formation des équipages, en mettant à disposition des outils d'aides à la décision, et enfin par des outils de monitoring de la performance et des usages.
- La sobriété, à travers la réduction de la vitesse des navires sera prise en compte en lien avec l'excellence opérationnelle puisqu'elle va supposer le développement de simulation intégrant une plus faible vitesse es.

Les trois axes détaillés plus haut sont repris ci-dessous en synthèse dans la figure en thèmes et sous thèmes (cf. Figure 2) et une évaluation des délais de réalisation est proposée par les industriels concernés. Cette vision doit bien sûr être révisée à échéance régulière pour tenir compte des évolutions technologiques et réglementaires futures.

THEMES	Time To Market <3ans / 3-5 ans / >5 ans
Réduction des émissions de GES de l'énergie consommée	
Energie Stockéeneutre en carbone ou décarbonée	> 5ans
Systemes propulsifs utilisant une énergie renouvelable à bord	<3 ans
Hybridation	3- 5 ans
Électrification des quai	3 - 5 ans
Traitement des emissions GES et polluants	>5 ans
Efficacité énergétique	
Design Optimal et technologies	3 - 5 ans
Excellence opérationnelle	< 3 ans
Mutation de la flotte existante	
Refit / MCO	3 - 5 ans
Eco-Conception	
Limitation de l'empreinte environnementale de la phase de conception	> 5ans

Figure 2: Délai d'accès au marché pour les grands thèmes évoqués dans cette feuille de route.

Cette feuille de route se donne pour objectif d'identifier les grands verrous à lever autour de ces trois axes afin d'accompagner la filière, ses acteurs et les financeurs (publics ou privés) attachés à son développement dans leurs choix stratégiques et d'investissement. A ce titre elle doit être :

- Un guide pour les politiques régionales, nationale et européenne françaises afin d'intégrer au mieux les évolutions réglementaires, fiscales ou de formation nécessaires au développement de la thématique « Green ship ».

- un guide pour les financeurs publics destiné à cibler au mieux les thématiques des appels à projets qu'ils souhaitent lancer sur le sujet du navire écologique. Par ce moyen il s'agit aussi bien de pousser à l'émergence de nouvelles technologies que d'accélérer la maturation des technologies permettant de réduire l'impact environnemental.
- Une référence pour les industriels autour de laquelle s'inscrivent leurs projets qui contribuent aux objectifs communs et font progresser les acteurs et l'écosystème de la filière. Elle doit permettre de fédérer une dynamique collective.

III. La réduction des émissions en GES de l'énergie consommée

La priorité nous semble résider dans un approfondissement des possibilités de nouveaux modes de propulsion plus « verts », pour sélectionner, développer et industrialiser les solutions les plus porteuses à court, moyen comme à long terme, en fonction des usages (et types de navires associés), et en s'appuyant dès maintenant sur les solutions déjà disponibles ou en passe de l'être pour amorcer cette transition (notamment le GNL, la propulsion hybride et/ou 100% électrique, la propulsion vélique).

Les nouveaux systèmes énergétiques et propulsifs sont déjà identifiés pour la plupart. Il s'agit en majorité de technologies soit historiques, soit testées, voire mises en œuvre, dans d'autres filières de mobilité.

A. Énergie stockée neutre en carbone ou décarbonée

1. Remplacer le Heavy Fuel Oil

Le moyen qui peut sembler le plus simple est de remplacer l'énergie actuellement utilisée pour le maritime par un carburant moins carboné. Cette transformation reste cependant particulièrement complexe car elle nécessite d'un côté de mettre en place une chaîne d'approvisionnement dédiée (Upstream) et de modifier de façon plus ou moins importante le navire (Downstream). A titre d'exemple, le passage du HFO au Gas Naturel Liquéfié (GNL) a nécessité entre 8 à 10 ans avec des investissements importants réalisés par CMA CGM et TOTAL (construction de nouveaux navires, de barges de soutage, de nouveaux moteurs, etc ...).

On peut distinguer deux solutions :

- Les solutions de Drop-in qui permettent de ne pas modifier le navire mais seulement d'ajuster la motorisation. Par exemple le Bio-fuel ou bioLNG ne nécessitent que peu de modifications des navires acceptant actuellement du HFO ou du LNG.
- Les solutions Non Drop-in qui vont nécessiter des modifications plus ou moins fortes de la chaîne de stockage et de propulsion des navires.

2. Les différentes molécules alternatives

On peut citer les différentes solutions possibles :

- Le Méthane, qui sous sa forme fossile (LNG) émet moins de CO₂ que du fuel et présente des performances environnementales largement supérieures concernant la qualité de l'air (réduction des particules, NO_x et SO_x). Cependant cette solution induit des fuites de méthane (Méthane Slip) qui réduisent son effet positif sur le réchauffement climatique. Les solutions de décarbonation sont d'utiliser du bio-méthane ou encore du e-méthane produit à partir d'électricité décarbonée et de CO₂, et de réduire les fuites de méthane lors de son utilisation.
- L'Hydrogène qui serait produit à partir d'électricité décarbonée. Son usage à bord des navires est actuellement envisagé pour des navires dont le design et le modèle opérationnel sont compatibles avec sa densité énergétique bien plus faible que les fuels conventionnels et donc qui peuvent intégrer un volume de stockage à bord bien plus important pour la même énergie (ex. x 16 pour H₂ liquide par rapport au fuel actuel HFO/MGO en volume brut). Ce combustible est a priori limité à des navires ayant des autonomies très réduites. Les

principaux challenges liés à cette molécule à bord des navires sont liés au soutage, au stockage à bord, à la conversion en énergie mécanique (pile à combustible puis hybridation électrique ou moteur thermique à hydrogène, voire turbines à hydrogène). La sécurité à bord des navires et lors des opérations sont un enjeu fort à la fois technologique et réglementaire en raison de sa très forte explosivité.

- L'Ammoniac, produit à partir d'hydrogène vert pourrait aussi être un moyen de stoker de l'énergie sans molécule de carbone. L'ammoniac présente cependant une densité énergétique faible, nécessite un complément de carburant (pilot fuel) pour permettre une combustion dans un moteur, et est aussi très toxique et corrosif.
- Le Méthanol ou plus généralement les alcools qui présentent l'avantage d'être stockés à température et pression ambiantes, mais ont une densité énergétique volumique plus faible que le méthane, et un niveau de toxicité important.

Cette description succincte montre qu'il n'existe pas de solution idéale. Chaque solution décarbonée présentant des inconvénients en termes de densité énergétique, de sécurité, de toxicité, et cela nécessite de mettre en place un réseau de distribution et d'approvisionnement jusqu'au navire (réseau LNG en cours de passage à l'échelle pour le maritime). Les bio-fuels ou bio-gaz risquent de n'être disponibles que dans des quantités limitées, et l'ensemble des e-fuels nécessiteront des quantités importantes d'énergie électrique décarbonée.

Les réductions d'émissions obtenues par l'analyse de cycle de vie des e-fuels sont très variables selon le type de carburant et surtout l'empreinte électrique utilisée pour les produire. On peut atteindre par exemple dans le cas du méthanol 80-85% de réduction sur la base de carbone biogénique et d'un mix électrique renouvelable. Dans ce contexte il est indispensable que les acteurs maritimes se rapprochent des énergéticiens et des producteurs de carburants.

3. Les systèmes propulsifs utilisant une énergie transformée

Les principaux systèmes qui seront demain utilisés dans le domaine de la mobilité fluviale et maritime sont :

- Les piles à combustibles : « Solid Oxide Fuel Cell » (SOFC), « Low-temperature/High Temperature Proton Exchange Membrane » (LT-PEM et HT-PEM) voire Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC), fonctionnant aux carburants actuels (en particulier LNG) et futurs (méthane, méthanol, ammoniac, hydrogène dans leurs versions e-fuels et/ou bio-fuels),
- Les moteurs thermiques adaptés lorsque nécessaire ou développés spécifiquement pour les futurs carburants,
- Les batteries (alimentés par des sources d'électricité verte), pour les applications à courte distance, ou en complément des sources d'énergie précédentes.

a) Piles à combustible

De manière générale, les besoins de R&D pour les systèmes énergétiques utilisant une énergie transformée concernent le développement et l'industrialisation **en conditions marines** de ces systèmes (y compris pour de fortes puissances (multi MW)) afin de les rendre économiquement viables et techniquement robustes pour être utilisés en mer. Cet enjeu de marinisation est très important du fait même de la nature dangereuse du milieu maritime qui exige la fiabilité des systèmes, les avaries pouvant très rapidement mettre en jeu la sécurité globale des équipages des navires et des chargements. Ce sujet de marinisation suppose la mise en place de démonstrateurs à

l'échelle une et en conditions réelles. Il faut enfin tenir compte de la capacité de maintenance de ces systèmes qui nécessiteront des compétences aujourd'hui qui n'existent pas.

Les solutions piles à combustible de type PEM sont aujourd'hui en cours de déploiement, notamment pour les usages terrestres routiers ou ferroviaires. Par ailleurs, les premiers projets fluviaux et maritimes à l'échelle vont entrer en exploitation dès 2022 sur des navires de service portuaire, des navettes de passagers ou des barges fluviales. En accord avec les objectifs de la filière (pour la navigation côtière et intérieure en accord avec les objectifs de l'étude « Trajectoire pour une grande ambition hydrogène »¹) il convient de soutenir d'ici 2028/2030 l'émergence d'au moins 15 à 20 écosystèmes de minimum 5 navires à hydrogène équipés de PEMFC pour accélérer l'adaptation et l'industrialisation des solutions ainsi que standardiser l'intégration dans les navires fluviaux ou maritimes. De nombreux ports se mobilisent déjà sur l'hydrogène. Déjà une trentaine de projets de navires et bateaux d'ici 2025 ont été recensés, avec une forte composante d'acteurs français. Des navires de puissance plus faible (plaisance, etc.) ou des systèmes hybrides (gasoil / H2) peuvent également être déployés.

Il convient également de soutenir les efforts de R&D et d'innovation pour des solutions de pile à combustible dédiées au maritime de grand gabarit et notamment des ferries, paquebots et feeders. Un 1^{er} démonstrateur de pile à combustible SOFC fonctionnant au GNL sera implanté sur le futur paquebot MSC World Europa livré en 2022. Des projets pionniers de grande envergure (ex. : piles SOFC multi-MW, 9500 tH2/an pour alimenter à 100 % un ferry en méthanol) pourraient voir le jour d'ici la fin de la décennie et placer la France parmi les pionniers du domaine. La mise en exploitation d'au moins 5 navires à hydrogène ou e-fuels utilisant ces technologies de pile à combustible serait une étape majeure et indispensable pour la filière.

b) Moteurs ou turbines

Les systèmes énergétiques de types moteurs à combustion interne et turbines sont couramment utilisés sur les navires. L'enjeu de R&D repose ici essentiellement sur l'adaptation de ces systèmes à de nouveaux combustibles et la capacité à tester à l'échelle ces systèmes. La validation des performances devra nécessairement passer par des installations sur des navires commerciaux,.

Il n'existe plus en France de fournisseur de moteur à combustion interne de forte puissance de taille mondiale mais encore un fournisseur de turbine (GE, ex. Alstom, voire SAFRAN qui travaille à des solutions comparables pour l'aéronautique). Il y a donc grâce à ces nouvelles technologies une opportunité de maintien voire relocalisation d'activités, de prise de leadership mondiale de l'Europe sur ces sujets et un enjeu de souveraineté nationale pour la France.

Ces deux types de systèmes énergétiques et propulsifs sont soumis à un réel enjeu de financements publics de ces objets nécessairement très capitalistiques pour les tests en conditions réelles et leur passage à l'échelle 1.

Les principaux thèmes de travail associés sont :

Définir en commun les besoins du maritime en intégrant ses spécificités: approvisionnement, stockage, conversion (moteur, PAC, etc. ...)

Réaliser des études d'impact de type Analyse du Cycle Vie (ACV) sur les différentes énergies, des études de risques des études technico-économiques sur les disponibilités et prix, évaluer les compétitions d'usage par rapport à d'autres besoins, etc. ...

1

<http://www.afhyac.org/documents/France%20Hydrog%C3%A8ne%20trajectoire%20grande%20ambition%20H2%20final%20web.pdf>

<i>Développer la production d'énergie dédiée au maritime lorsque possible, comme des bio-fuel ou biogaz de qualité suffisante pour les moteurs marins et cela à moindre coût</i>
<i>Mettre en place les réseaux d'approvisionnement jusqu'au navire en intégrant les ports</i>
<i>Favoriser l'usage du Bio-Fuel et du Bio-GNL pour le maritime</i>
<i>Améliorer l'efficacité de la chaîne propulsive GNL comme énergie de transition</i>
<i>Développer des convertisseurs d'énergie de forte puissance compatibles avec ces nouvelles molécules (piles à Combustible, moteurs à combustion interne, turbine)</i>

4. Soutage et Stockage

À bord d'un navire, l'espace est toujours compté et le volume utile pour le transport (marchandises, passagers...) doit être maximisé par rapport aux volumes techniques nécessaires à l'opération du navire. La compacité des solutions techniques vertes est donc un critère essentiel de la compétitivité du navire. Notamment les combustibles du futur ayant une densité volumique d'énergie bien moindre que les combustibles actuels (typiquement diesel), cette contrainte y est très prégnante, et les solutions de stockage d'énergie choisies peuvent varier selon la nature des navires (petits ou grands) et les typologies de missions (côtière ou hauturière).

Par exemple pour la pile à combustible à membrane échangeuse de proton (PEM) fonctionnant à l'hydrogène, un sujet majeur est la réduction du volume nécessaire au stockage de l'hydrogène, d'où l'intérêt porté au stockage à l'état liquide, par rapport à l'état gazeux.

La faible maturité technologique de ces solutions de stockage, notamment pour les gros volumes, et leurs contraintes associées (coût, opération...) sont aujourd'hui un frein important à leur implantation à bord des navires. Ceci est particulièrement vrai pour l'hydrogène dont la densité en phase liquide est de 71kg par m³ ce qui est un frein à son usage pour de longs trajets puisque outre l'énergie nécessaire à la compression en phase liquide, il faudrait gérer la très basse température et le système d'isolation du contenant potentiellement très volumineux en lui-même. Le développement de réservoirs de stockage sûrs et adaptés aux conditions marines (poids, encombrement) est donc un corollaire indispensable au développement de l'usage à bord de systèmes énergétiques décarbonés (que ce soit pour la propulsion ou pour les usages à bord). Toutefois, le secteur maritime peut bénéficier des avancés du secteur terrestre où des solutions matures existent pour des stockages comprimés permettant d'envisager la conversion à court terme de navires dont le besoin d'énergie à bord est limité (quelques centaines de miles marins).

Des transferts technologiques et adaptations sont donc à prévoir et à accélérer pour adapter ces solutions aux spécificités du maritime.

Les principaux thèmes de travail associés sont :

<i>-Développer des cuves de stockage de différentes capacités adaptées au domaine maritime (grosses capacités, corrosion, mouvements du navire, prix réduit, contraintes de masse réduites par rapport à d'autres moyens de transport ...)</i>
<i>-Développer des solutions de soutage permettant de réaliser des opérations simultanées au port (soutage et chargement / déchargement des navires)</i>

5. Sécurité et robustesse

Les systèmes utilisant des matières potentiellement dangereuses doivent pouvoir être utilisés en toute sécurité à bord et être en capacité de résister aux avaries du navire. Par exemple l'usage d'hydrogène, d'ammoniac ou de GNL s'accompagne de risques potentiellement plus grands pour les équipages que le carburant marin actuel. Leur usage doit donc être très largement sécurisé aussi bien

pendant les phases de ravitaillement qu'en cas d'incident sur le navire. Les problématiques de sécurité du stockage des nouveaux carburants sont un enjeu à la fois technologique et réglementaire en particulier sur les navires à passagers. Les démonstrateurs et le passage à l'échelle doivent permettre de mettre en place les mesures et réglementations permettant l'adoption de ces nouveaux carburants sur les navires.

Ces systèmes de transformation d'énergie seront, par définition de leur destination, soumis à des conditions environnementales sévères. Leur robustesse (i.e. leur capacité à exercer leur fonction dans la durée) est un facteur clef de succès majeur pour leur développement. Cela concerne aussi bien les systèmes que les matériaux qui les constituent (matériaux utilisés dans les cuves de stockage d'hydrogène ou ammoniac par exemple).

Ces deux éléments sont des critères qu'il faudra systématiquement prendre en compte dans les futures innovations (en intégrant en particulier les coûts associés).

La certification et l'homologation sont des étapes clés pour des solutions innovantes qui peuvent prendre du temps et nécessiter de forts investissements financiers, surtout pour les premiers projets pilotes. Un accompagnement spécifique est à prévoir.

Les principaux thèmes de travail associés sont :

<i>Réaliser des études d'analyse de risque (design (HAZID) et opération (HAZOP)) pour les différentes solutions technologiques</i>
--

<i>Mettre en place des méthodologies de Risk Based Design intégrant par exemple de la redondance sur les systèmes critiques</i>

B. Les systèmes propulsifs utilisant une énergie renouvelable à bord

1. Propulsion vélique

La propulsion des navires par le vent est une composante à fort potentiel pour le maritime. En effet, l'énergie du vent présent directement autour du navire est décarbonée et peut être donc utilisée gratuitement et avec un excellent rendement à la différence d'un système de captation et de transformation disposant d'un rendement très faible, de l'ordre de 20% (éolienne en mer, électrolyse, liquéfaction, transformation, stockage, conversion en énergie mécanique ...).

Utiliser directement l'énergie disponible autour du navire est donc une évidence pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et propulser les navires de manière auxiliaire voire principale dans certaines configurations de routes et de navires.

Les principales difficultés rencontrées aujourd'hui pour le développement des projets sont :

- La possibilité de tester les prototypes à l'échelle sur des navires, car l'armateur doit prendre un risque économique pour installer ces premiers systèmes, et ne dispose pas d'appuis financiers suffisamment incitatifs à ce jour,
- L'automatisation pour que cela ne soit pas une charge supplémentaire pour l'équipage,
- La réglementation,
- L'industrialisation et la maintenance des systèmes,
- L'harmonisation des méthodes d'évaluation des performances des navires,
- La gestion de l'intermittence de manière opérationnelle et réglementaire (Simplicité de passage d'un système propulsif à l'autre dans des solutions hybridées / Automatisation des systèmes),
- Performance des systèmes de propulsion par le vent (Robustesse des systèmes / finesse aérodynamique des systèmes),

- L'impact opérationnel (pour adapter les systèmes aux conditions de manutention, pour limiter les impacts lors des opérations portuaires, etc ...),
- les contraintes d'intégration en fonction des types et tailles de navires (interférence avec accès aux soutes, contraintes de tirant d'air...),
- Gestion de l'énergie de bord et optimisation de la chaîne propulsive pour maximiser les économies d'énergie à la voile,
- Optimisation des superstructures navire, de la carène, et intégration d'équipements : appendices, plan antidérive etc. permettant de maximiser les performances à la voile.

Les principaux systèmes en cours de développement sont : voiles à profil mince ou épais, souple ou rigide, à un ou plusieurs éléments, des systèmes de rotors Flettner, des ailes à profil aspiré, des ailes de kite. Chaque système présente des avantages et inconvénients en termes de coûts, maintenance, facilité d'usage, performance, capacité d'intégration à bord, etc... Certains systèmes sont déjà en tests sur des navires (rotor, profil aspiré, profil épais par exemple). Quinze navires de charge sont déjà équipés dans le monde. Les prochains navires de transports de marchandise à propulsion vélique économiquement viables devraient sortir de chantier à partir de fin 2022.

Utilisant une énergie primaire gratuite et disponible, la propulsion par le vent réduit de 10 à 80% des besoins énergétiques du navire, le niveau de réduction étant en grande partie lié à la vitesse de navigation de celui-ci, à sa route et à la qualité de son routage (Recherche du meilleur optimum entre distance parcourue et vent disponible).

Les principaux thèmes de travail associés sont :

<i>Tester des prototypes à l'échelle sur des navires</i>
<i>Fabriquer des démonstrateurs et organiser mesure de performance</i>
<i>Développer la robustesse/performance des systèmes / augmenter leur finesse aérodynamique</i>
<i>Identifier l'impact opérationnel des différentes technologies véliques pour les adapter aux conditions de manutention, pour limiter les impacts lors des opérations portuaires, etc. ...</i>
<i>Optimiser la gestion de l'énergie de bord et la chaîne propulsive pour maximiser les économies d'énergie à la voile</i>
<i>Optimiser les superstructures navire, de la carène, et intégration d'équipements : appendices, plan antidérive etc. permettant de maximiser les performances à la voile</i>
<i>Mixer les solutions véliques fixées sur le pont avec des solutions véliques aéroportées (kites)</i>
<i>Opérabilité et Automatisation des solutions véliques, introduction de l'intelligence artificielle</i>
<i>Règlementations, approbation, robustesses & Safety des solutions Véliques,</i>
<i>Développer l'industrialisation et la maintenance des systèmes</i>
<i>Adapter les systèmes aux différentes conditions de vent</i>
<i>Généraliser l'intégration des systèmes à tous les types et tailles de navires</i>
<i>Gérer l'intermittence de manière opérationnelle et réglementaire</i>

2. Autres sources d'énergie renouvelable

De façon plus complexe, l'utilisation de l'énergie des vagues et des mouvements associés du navire apparaît aussi comme une énergie mobilisable pour une partie de la propulsion des navires. Ce concept doit encore faire l'objet d'une montée en TRL même si des premiers systèmes ont pu être testés à bord de navires de l'IFREMER notamment.

Le thème de travail associé est :

Eolien, PV, Hydrogénérateur en propulsion vélique

3. Production d'énergie à bord

Un navire peut aussi être regardé comme un objet producteur d'énergie selon les étapes de sa mission ou de son mode de propulsion. La propulsion vélique qui utiliserait directement le vent pour se déplacer pourrait utiliser une partie de cette énergie qui serait en surabondance pour couvrir partiellement/totalement les besoins énergétiques du bord (hors propulsion), voire dans le cas de navires où les besoins énergétiques du bord sont faibles alimenter en complément des systèmes destinés à stocker une énergie qui pourra ensuite être utilisée (peak Shaving) pour des manœuvres spécifiques comme les approches portuaires. Dans ce contexte, on peut imaginer par exemple, le développement d'hydro-générateurs innovants avec un stockage batterie ou sous forme gazeuse avec des systèmes de production d'e-fuel embarqués adaptés aux conditions marines. Les principaux enjeux que l'on peut mentionner sur ce point concernent la gestion de l'intermittence de la production et des gains variables selon les routes, mais aussi la complexité et la robustesse des systèmes à installer à bord.

Compte tenu de la faible puissance énergétique disponible autour du navire par rapport aux besoins en consommation, ces solutions ne seront que marginales par rapport aux besoins opérationnels.

C. Hybridation

La diversité des systèmes énergétiques qui seront disponibles dans les années à venir nécessitera la mise en place de systèmes hybrides à bord des navires pour assurer l'optimisation énergétique pour chaque phase d'usage (en route, à quai ou en manœuvre), en fonction de la disponibilité des nouveaux carburants et les contraintes réglementaires comme la navigation dans des zones protégées.

Aujourd'hui des systèmes hybrides sont déjà opérationnels sur certains navires comme les paquebots ou certains ferrys (propulsion Diesel électrique). Les enjeux auxquels sont confrontés les acteurs industriels concernent le choix optimal des hybridations possibles étant donné la multiplicité des systèmes disponibles et en cours de développement (batteries, piles à combustible, générateurs, etc.). Ces hybridations vont nécessiter le développement d' « Energy Management System » (EMS) adapté ainsi que l'intégration de ces systèmes complexes à bord des navires dès la phase de conception.

Les principaux thèmes de travail associés sont :

<i>Hybrider les navires en permettant d'électrifier tout ou partie de la chaîne propulsive</i>
<i>Développer des convertisseurs d'énergie de forte puissance à partir d'Hydrogène, d'ammoniaque, de méthanol ou autres molécules (Piles à Combustible, moteurs à combustion interne, turbine)</i>
<i>Développer des architectures d'hybridation des navires en permettant d'électrifier tout ou partie de la chaîne propulsive</i>
<i>Développer des outils de pilotage et contrôle de l'énergie à bord pour s'assurer du fonctionnement le plus efficace sur l'ensemble des phases opérationnelles (approche design et opérations)</i>
<i>Tester des hybridations moteur électrique marinisées / hydrogène et propulsion par le vent</i>

D. Electrification à quai

Le **courant de quai** ou « **Cold Ironing** » doit permettre de résoudre une problématique majeure de la pollution des navires que sont les émissions de GES ou de particules fines lorsque le navire est à quai. La stratégie qui consiste à alimenter le navire pour ses usages à quai par une production électrique

venant de la terre ou de barges spécialisées, doit être développée soit via des connexions directes au réseau si celui-ci est alimenté par des ENR ou bien par des boucles (grid) locales lorsqu'il existe par exemple des productions possibles dans la zone portuaire (on fait ici le lien avec la feuille de route NEXT-GEN OFFSHORE INDUSTRY).

Le thème de travail associé est :

Poursuivre l'électrification à quai des navires pour réduire leurs émissions dans des zones péri-urbaines et bénéficier de cette énergie (sous-réserve qu'elle soit décarbonée) pour stocker une partie d'énergie à bord des navires

E. Traitement des émissions et polluants

1. Capture et stockage de CO2

A minima pour une phase de transition, les émissions de carbone seront encore incontournables (que le carbone soit fossile ou non fossile (Bio fuel / Bio gaz)). Des travaux concernant la capture et le stockage du carbone doivent donc être menés de manière à réduire les émissions de GES avec les carburants actuels. Sur ce sujet des technologies terrestres existantes et/ou sont en cours de développement. Les enjeux associés pour le secteur maritime sont néanmoins spécifiques comme le volume des installations nécessaires à bord pour réaliser cette capture et les volumes de stockage. Une approche globale devra être entreprise en intégrant l'énergie consommée à bord par le système de capture et de stockage, les opérations de déchargement et de valorisation du CO2 à terre.

Le thème de travail associé est :

Réaliser une pré étude sur des systèmes de stockage du CO2 à bord des navires de tailles et caractéristiques différentes, incluant une approche globale (technologie, intégration, bilan d'énergie, modèle économique, etc. ...)

Développer un ou des systèmes adaptés aux différentes gammes de navires

2. Réduction des fuites de méthane

L'usage du GNL à bord des navires a été un challenge technique et énergétique sur les dix dernières années. Les gains en terme de qualité de l'air sont très importants, tout comme les gains en CO2 sous réserve que les fuites de méthane (méthane slip) soit réduites au minimum, aussi bien en amont du navires (WTT) que sur le navire (TTW). Pour cela, les motoristes doivent développer des solutions

Le thème de travail associé est :

Développer et évaluer des technologies permettant de réduire les fuites de méthane sur l'ensemble de la chaîne upstream et downstream

3. Traitement des émissions et polluants

Ce point concerne toutes les marines. Les sources d'émissions d'un navire sont multiples : solides, liquides, gazeux (GES et polluants atmosphériques), bruit sous-marin. Depuis la captation de carbone issu de la combustion (cf. § ci-dessus), l'usage des déchets organiques issus de l'hôtel d'un paquebot ou bien encore la gestion des eaux noires ou les eaux grises ainsi que les eaux de ballast ou le bruit sous-marin, il importe pour la réduction des impacts qu'elles soient toutes adressées.

Le sujet des bruits sous-marin concerne en particulier un enjeu de réponse à des évolutions réglementaires liées à la DCSMM et à l'OMI.

Pour les navires fonctionnant avec des gaz à fort effet de serre (CH4 par exemple) il faudra également travailler sur les systèmes de sécurité pour limiter les dégagements intempestifs dans l'atmosphère.

Ces émissions doivent être intégrées dans un cycle d'économie circulaire mais avec une contrainte majeure à bord des navires qui est l'encombrement. Cela concerne aussi bien leur traitement et leur stockage.

IV. Efficacité Énergétique

A. Design Optimal et technologies

1. Réduction de la consommation énergétique

Plusieurs innovations permettent de réduire la consommation énergétique. La réduction de la traînée, ou encore des solutions liées à l'usage d'équipements moins énergivores et adaptés à des conditions opérationnelles variées constituent des solutions à développer. Cela peut se concrétiser par le développement de nouvelles carènes adaptatives, les propulseurs innovants, de systèmes d'Energy Saving Device (ESD), le développement de plans porteurs (foil) pour des navires à faible déplacement, l'injection d'air sous la carène, des revêtements de coque réduisant le frottement et/ou des salissures sur la coque, etc ...

Les EMS ont été mentionnés à propos du sujet de l'hybridation, mais ces outils doivent aussi être développés de manière à optimiser la consommation énergétique à bord.

La propulsion par le vent et l'usage du mouvement du navire dû notamment aux vagues font appel à des énergies primaires disponibles et gratuites. Évitant toute émission de gaz à effet de serre, elle réduit le besoin énergétique résiduel du navire (cf. § Production d'énergie à bord).

Les thèmes de travail associés sont :

<i>Développer des technologies de réduction de l'énergie à bord des navires</i>

<i>Mise en place de systèmes hybrides à bord des navires pour assurer l'optimisation énergétique</i>
--

2. Conception des navires

La réduction de la consommation énergétique doit se penser dès la phase de conception. Les avancées dans l'intégration de technologies de réduction de la traînée et la conception des systèmes énergétiques des navires constituent encore un levier de réduction de la consommation énergétique. On peut citer explicitement les appendices, foil, bulbe optimisé, hélices et propulsions innovantes, nouveaux revêtements, moteurs électriques à vitesse variable, chillers à absorption...

Au-delà de ces améliorations technologiques, les améliorations des méthodes de design peuvent aussi permettre d'obtenir des gains. Trop navires ne bénéficient pas d'études d'optimisation des performances hydrodynamiques ou énergétiques pour des raisons de coûts ou d'intégration dans les plannings de conception / fabrication et lorsque ces phases sont intégrées, elles se réduisent trop souvent à l'optimisation du chantier sur la vitesse servant à la réception du navire auprès de l'armateur. Il est indispensable de généraliser des études d'optimisation des performances hydrodynamiques et énergétiques sur les profils opérationnels réels des navires. Cela nécessite une connaissance en amont de ces éléments, appuyés par un monitoring précis des usages du navire.

La reconception des navires dans une optique de réduction forte de leur empreinte environnementale peut aussi nous amener à reconsidérer de nouvelles solutions mieux adaptées aux

missions opérationnelles. La réalisation des missions maritimes à bord de plateformes plus petites, mieux utilisées et plus efficaces que les moyens traditionnels (ex. en utilisant les drones ou navires téléopérés) est aussi un levier de réduction de l'impact environnemental. (Lien fort avec la Feuille de route SmartShip)

Pour cela la simulation numérique de l'usage énergétique et de l'impact environnemental du navire que nous pouvons qualifier de « jumeau numérique » doit être intégrée lors de la conception. Cette simulation doit aussi être utilisée durant la phase d'exploitation des navires et de leurs équipements en tenant compte des cas d'usages des navires (approche holistique) en préparation de leurs missions. Enfin, ces outils sont également nécessaires en temps réel pour optimiser l'exploitation et se rapprocher au maximum des scénarios envisagés lors des phases de préparation de missions.

Pour cela le **développement de l'IA** (Intelligence Augmentée), rendu possible grâce à l'accroissement régulier des puissances de calcul, ouvre des perspectives très intéressantes aussi bien lors des étapes de conception, de préparation que d'usage en temps réel de l'énergie à bord d'un navire. On peut mentionner de manière plus spécifique le développement **d'outils destinés à l'optimisation des missions** afin de réduire des déplacements inutiles, des temps d'attente etc.... autant de phases où les navires et bateaux consomment sans être productifs.

En s'inspirant d'autres secteurs industriels comme le bâtiment ou l'industrie et grâce à des systèmes experts voire apprenants, la filière des industriels de la mer entend améliorer sa capacité à optimiser ses consommations énergétiques (Le lien est fait sur ce point avec la feuille de route SMARTSHIP).

Les thèmes de travail associés sont

<i>Développement de l'IA dans les systèmes</i>
<i>Développement de design de carènes et d'appendices permettant d'optimiser l'hydrodynamique des navires et de solutions d'allègements des navires</i>
<i>Analyses des paramètres extérieurs, vent, mer, mouvements du navire et optimisation de son rendement, logiciel de performances</i>

3. Récupération et gestion optimisée de l'énergie

La récupération de l'énergie dissipée à bord est une option pour réduire la consommation globale des navires. De multiples sources sont à identifier par une approche systémique d'« energy harvesting » (Chaleur fatale, froid fatal, vibrations, contraintes mécaniques, etc.).

C'est une opportunité de développement de systèmes innovants qui peuvent ensuite se décliner dans d'autres filières de mobilité.

Les thèmes de travail associés sont :

<i>Récupération de l'énergie dissipée par les systèmes</i>
<i>Réutilisation de l'énergie en surabondance pour couvrir partiellement/totalement les besoins énergétiques du bord</i>

B. Excellence Opérationnelle

1. Opération des navires

Les développements technologiques notamment en lien avec le Smart Ship doivent bénéficier aux marins et opérateurs pour opérer les navires en conditions réelles aux points d'utilisation minimisant

l'impact environnemental pour la mission donnée. Les leviers d'aide à la décision reposent à la fois sur un monitoring actif du navire et des usages ainsi que sur la mesure environnementale. En particulier **l'optimisation du routage, de l'utilisation des équipements et de l'interface avec les objectifs et écosystème du navire** permet d'envisager la maîtrise des besoins énergétiques. Pour le routage, la prise en compte des conditions météo, au-delà du critère de sécurité est aussi un critère de réduction de l'impact environnemental. Si la route la plus directe donc la plus courte est un gage de délai réduit, savoir utiliser des zones de vent et de courants plus porteuses, savoir éviter des difficultés météo sont des moyens de réduire la consommation pour un trajet donné (Le lien est fait sur ce point avec la feuille de route SMARTSHIP).

Les pistes de développement ouvrent des opportunités de croisements avec d'autres filières mobilités et offrent également un marché conséquent à des acteurs économiques aujourd'hui non tournés vers le maritime.

Les thèmes de travail associés sont

<i>Développement de l'IA dans les systèmes</i>
--

<i>Monitoring actif de la mesure environnementale du navire / optimisation via le routage</i>

<i>Le monitoring des gains en économie de carburants</i>
--

<i>Le monitoring des qualités des rendements</i>
--

2. Formation

Le développement de nouveaux systèmes énergétiques et propulsifs décarbonés, d'installation de nouveaux systèmes ou encore de conduite de navires véliques nécessite que des compétences nouvelles soient acquises par les femmes et les hommes qui travaillent dans la filière maritime tant embarqués qu'à terre.

Ces nouveaux métiers et nouvelles compétences sont une opportunité de développement d'emplois de marins qui aujourd'hui sont encore largement délocalisés dans les pays asiatiques.

Le thème de travail associé est :

<i>Formation et développement de nouvelles compétences pour les marins en lien avec les nouveaux systèmes</i>

V. Sobriété

Les enjeux liés à ce point sont des enjeux moins technologiques que ne le sont les sujets liés à la réduction des GES de l'énergie consommée ou de l'efficacité énergétique des systèmes. Néanmoins, l'adaptation du niveau de service peut représenter des gains importants de besoins énergétiques. Par exemple la question de la réduction de la vitesse des navires qui mécaniquement réduit la consommation d'énergie et donc les émissions de GES est à aborder sous l'angle économique pour le secteur maritime. Cela suppose une chaîne logistique qui se modifie et revoit globalement son organisation. Il faut en revanche être attentif aux conséquences de ce type de décision à l'échelle macroscopique. Si pour les transports de touristes îles-continent par exemple cela peut être neutre, le transport de marchandises devra augmenter la flotte si la vitesse est réduite sans réduire la quantité de marchandises transportées. En outre cela réduirait la compétitivité de la filière alors que le transport maritime reste le plus vertueux en terme écologique rapporté à la tonne transportée.

VI. Mutation de la flotte existante

Si la construction neuve est porteuse de nouvelles technologies, les objectifs de réduction d'émission de GES ne sauraient être atteints sans travaux sur la flotte existante constituée de navires qui n'ont pas été conçus pour accueillir des technologies zéro émission. Le sujet du Refit doit donc être largement soutenu par les politiques publiques de soutien à l'innovation.

A. Refit / MCO

La cible visée par l'OMI ou le green deal européen nécessite impérativement de travailler sur la flotte de navires existants. Les enjeux commerciaux associés sont majeurs. Ce sujet présente des challenges spécifiques et les rentabilités de ces transformations (sur le plan économique et sur le plan environnemental) peuvent être supérieures à celles de la construction des navires neufs.

L'enjeu du retrofit dans la perspective de réduction des émissions mais aussi de consommation de matières premières est à considérer sur le cycle complet et peut apparaître plus efficace que le processus déconstruction navires existants / construction navires neufs.

Le traitement de la flotte existante est une source majeure d'innovation via des projets de R&D. L'installation par exemple de systèmes véliques sur des navires existants permettant de réduire leur besoin énergétique est un enjeu clé pour le développement du marché mondial des équipementiers français de propulsion par le vent, car les besoins sont immédiats, et certains de ces systèmes peuvent être installés très rapidement sur les navires.

De même, L'hybridation peut concerner également le refit partiel d'un navire en remplaçant seulement une part des motorisations diesel, notamment par des convertisseurs d'énergie à l'hydrogène. Cette solution apporte l'avantage de développer progressivement les infrastructures nécessaires aux nouveaux systèmes énergétiques.

L'intégration à bord d'équipements moins énergivores, l'ajout d'appendices permettant de réduire la traînée, le routage, etc. Toutes ces briques technologiques déjà mentionnées dans le premier axe doivent également être développées pour des navires existants et donc pouvoir s'adapter à des designs qui n'ont pas été nécessairement élaborés pour les recevoir.

Le refit est également un moyen de valider rapidement en conditions opératoires « marines » les technologies matures issues d'autres secteurs. C'est un accélérateur pour l'inclusion de nouvelles technologies dans le secteur et les premiers développements d'infrastructures portuaires adaptées.

Le retrofit de navires à l'aide d'e-fuels est également possible pour les nouveaux bateaux en dual-fuel sur des CAPEX de l'ordre de 2% supérieur aux navires conventionnels mais également pour des navires existants avec un CAPEX 3 fois inférieurs au CAPEX de retrofit LNG, principalement pour l'adaptation des cuves (doublement pour une autonomie équivalente) et modifications des moteurs. Ce sujet représente donc une opportunité pour une partie importante de la chaîne de valeur de la construction navale française depuis les cabinets d'architecture navale, les fournisseurs d'équipements et les chantiers de construction, de réparation et de maintien en condition opérationnelle (MCO) naval et de nautisme.

VII. De l'Eco-conception au démantèlement

Développer un navire neutre en carbone voire zéro impact nécessite désormais d'utiliser des méthodes d'éco-conception c'est-à-dire des méthodes qui tout au long du projet permettent de faire

des choix technologiques, de design ou d'organisation du bord éclairés par la quantification des impacts environnementaux issus de ces choix. Cela concerne toute la phase de conception des navires, depuis le dessin de la carène jusqu'au choix des matériaux utilisés en intégrant les missions du navire, ses usages, son organisation à bord, la gestion des déchets qu'il va produire (solide, liquide ou gazeux), jusqu'à sa déconstruction.

A. Analyse du cycle de vie

Le premier enjeu de ce thème concerne le développement d'une méthodologie, **outil et taxonomie reconnus** à l'échelle nationale puis portée au niveau européen, voire mondial, qui permettrait de valider de manière indiscutable **l'analyse du cycle de vie** des navires et productions des industriels de la mer et fournir les données de l'empreinte environnementale de notre industrie.

B. Limitation de l'empreinte environnementale dès la phase de conception

Sur la base de ce référentiel, **les améliorations de performances environnementales des navires** pourront être évaluées sur l'ensemble de leur cycle de vie. Ce type d'outil doit également permettre d'orienter les choix technico économiques des architectes et des chantiers qui souhaitent atteindre une performance environnementale donnée intégrant les **nouvelles technologies de fabrication et les nouveaux matériaux** (fort lien avec la feuille de route Smart Yard : nouveaux matériaux et chantiers intelligents).

La simulation numérique est un outil puissant qui doit encore être développé pour permettre une approche holistique et balayer plusieurs scénarios afin d'identifier un optimum entre les différentes contraintes liées à la conception du navire : impact environnemental lié à sa construction (Énergie, choix des matériaux, mis en œuvre, etc.), impact environnemental lié à ses usages (émissions polluantes, émissions de GES, impact acoustique, etc.), impact environnemental lié à sa déconstruction (réemploi, recyclabilité, valorisation, etc.).

L'enjeu réglementaire de ces nouveaux designs représente également une opportunité notamment pour les sociétés de classification présentes en France. Les gains envisageables dans ce domaine sont très significatifs et nécessitent un réel effort de recherche et de développement avec pour objectifs la prise en compte de **l'ensemble du cycle de vie** et des dernières technologies de production.

Le thème de travail associé est :

Rechercher des solutions alternatives aux composites issus de la pétrochimie et dont la performance environnementale est démontrée par des outils reconnus comme les analyses de cycle de vie.

C. Fin de vie des navires

La fin de vie des navires est un enjeu pour la filière. Si la déconstruction des bateaux métalliques est aujourd'hui intégrée étant donné la capacité de la filière de recyclage des métaux et la valorisation possible de ces déchets, des verrous restent encore à lever sur les bateaux plastiques et concerne largement la filière nautique. De manière opérationnelle, la fin de vie de ces navires consiste aujourd'hui à brûler ou à enfouir après avoir récupéré les quelques équipements d'intérêt. Il faut donc mettre au point des processus plus efficaces depuis les phases de collectes jusqu'à la valorisation des matières issues de la déconstruction. Si l'APER est un premier pas dans cette démarche, les débouchés des matériaux récupérés restent encore trop peu nombreux. A noter que cette démarche doit être rapprochée des problématique que rencontre l'éolien en mer à savoir le recyclage des pales d'éolienne hors d'usage (lien avec la feuille de route Smart Off Shore Industry).

Les thèmes de travail associés sont

Développer des solutions / filières de recyclage des composites

Recyclage de voiles, des tissus, des cordages...

VIII. Enjeux socio-économiques

Les travaux menés dans le cadre de la feuille de route « Green Ship » de la filière s'accordent sur un double enjeu en termes d'emplois sur le plan national. Il s'agit globalement de pérenniser les emplois existants en lien avec la construction navale et l'exploitation des navires. Ils représentent à ce jour environ 100 000 emplois². Mais il s'agit aussi de permettre le développement et la création de nouveaux emplois grâce aux technologies et savoir-faire de réduction d'impact environnemental. Ce développement est évalué à environ 10 000 emplois supplémentaires sur les quatre années à venir. Toutefois les enjeux vont au-delà du sujet des emplois. Il y a dans la **thématique « Green Ship » l'opportunité pour la France de devenir un champion européen et mondial du domaine**. Nos atouts sont multiples : La surface de notre ZEE, les compétences présentes sur les territoires aussi bien chez les acteurs industriels (chantiers, équipementiers, architecture navale, bureau de classification, etc.) que chez les acteurs académiques, le réseau existant entre tous les acteurs de la filière (y/c les armateurs), l'ambition politique nationale de la décarbonation, etc... et nous positionnent idéalement dans une course qui est déjà lancée. Nous y participons d'ores et déjà : développement des premiers navires marchands à voile, développement de la filière batterie, savoir-faire dans le domaine de l'Hydrogène, leaders mondiaux de la construction navale et de la plaisance (Chantiers de l'Atlantique, Béneteau, Naval Group). **Mais le soutien national en cohérence avec une position de leader mondial dans le domaine maritime reste indispensable** pour accélérer notre recherche industrielle et nos développements.

Les enjeux climatiques sont pour notre filière une opportunité très claire de **développement économique**, de **développement de l'emploi sur notre territoire** (nouveaux métiers et relocalisations), de **leadership national sur un axe majeur de la décarbonation de la mobilité maritime**. Il couvre les enjeux de **souveraineté nationale** et l'ensemble des priorités du plan de relance (i.e. Écologie, Compétitivité et Cohésion territoriale)

IX. Cible de réduction d'émission de gaz à effet de serre.

Les pistes développées dans cette feuille de route sont très diverses et doivent être comprises comme des solutions à regarder en fonction de l'usage du navire. Il est important de voir les futurs navires à faible voire zéro émission comme des optimums de solutions qui seront établis en fonction de la typologie du navire, de sa mission mais aussi de la disponibilité des sources énergétiques dans le temps et dans l'espace. Il est même envisageable qu'un bateau fasse évoluer son optimum selon l'évolution de ses missions. Il faut donc intégrer le fait que ces solutions devront être **modulables** et **adaptatives**.

En outre ces technologies ont été au mieux mises en œuvre très récemment (voire sont encore au stade du prototypage ou de mise au point en laboratoire) et n'ont pas encore assez de recul pour évaluer précisément leurs impacts même s'il est clair qu'il sera majeur (propulsion vélique par exemple).

² <https://ree.developpement-durable.gouv.fr/themes/milieus-et-territoires-a-enjeux/mer-et-littoral/economie-et-demographie/article/les-emplois-de-l-economie-maritime-en-2017>.

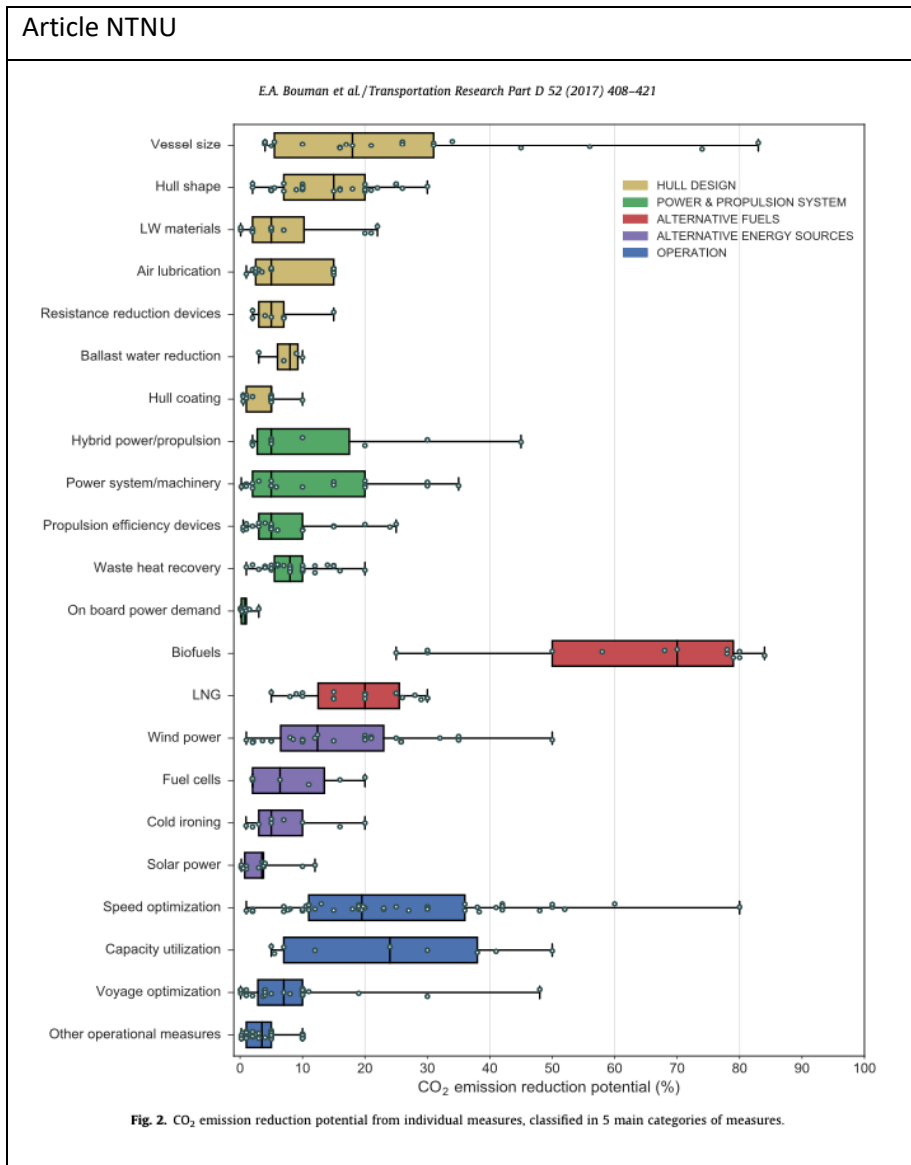
Par conséquent, il est difficile d'évaluer quantitativement la réduction potentielle d'émissions de gaz à effet de serre des technologies et des stratégies mentionnées dans cette feuille de route.

Néanmoins un certain nombre de monographies permettent de donner des ordres de grandeurs aux impacts. On peut citer par exemple l'article de Marine Digital³ qui propose la vision schématique des réductions ou bien encore un article du NTNU [BOUMAN17]⁴ basés sur différentes publications issues de projets disponibles dans la littérature scientifique.

³ https://marine-digital.com/article_green_ship?utm_source=facebook&utm_campaign=article_green_ship

⁴ State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review – Transportation Research Part D 52 (2017) 408 - 421

Article NTNU



Ces études datent déjà de plusieurs années, mais néanmoins nous pouvons considérer que les ordres de grandeurs sont justes avec toutefois quelques précautions.

Pour la propulsion vélique tout d'abord elle n'est envisagée ici que comme une propulsion secondaire. Or des projets arrivent sur le marché avec des propulsions principales (ex. Néoline) et qui devrait permettre de réduire de 80% la consommation d'énergie fossile par rapport à un navire équivalent propulsé au diesel marin.

Il faut également pondérer la performance attendue pour les bio-fuel par l'impact environnemental de leur processus de production. Il ne s'agit pas de déplacer la pollution depuis une émission maritime vers une émission terrestre. Il faut enfin sur ce sujet, tenir compte de la disponibilité de ces carburants dont on sait qu'elle risque d'être faible encore pour plusieurs années avec une compétition des usages.

Enfin il est nécessaire d'intégrer le fait que le choix de la stratégie de réduction dépendra aussi de la mission du navire. Il semble difficilement envisageable de réduire la taille des portes-containers, car

cela supposerait d'en accroître le nombre pour transporter la même quantité de marchandise et au global finalement d'accroître les émissions.

X. Pilotage, mise en œuvre et indicateurs de performance

1. Pilotage / Mise en Œuvre

Le pilotage de la feuille de route « Greenship » est assuré par un binôme constitué par les Chantiers de l'Atlantique (Pilote) et le Pôle de Compétitivité Mer Bretagne Atlantique (Co-Pilote). Cette action s'inscrit dans le cadre du comité R&D de la filière.

Les orientations technologiques étant données dans cette feuille de route, elle doit désormais être déclinées en projets qui doivent être mis en Œuvre de manière opérationnelle et coordonnée par les industriels (grand groupes, ETI, PME, startups) : les chantiers, les équipementiers, les fournisseurs, les armateurs et les ports en relation avec les énergéticiens, sans oublier l'écosystème de recherche et d'innovation (Centres techniques, IRT, Ecoles d'ingénieurs, Université).

Cette coordination est fondamentale car les projets sont transverses sur l'ensemble de la chaîne de valeur et multi filières, nécessite des montées en maturité rapides jusqu'à des démonstrateurs et l'industrialisation des solutions, et la multitude de solutions ne peut être adressé simplement ou sans vision globale au-delà de chaque acteur ou de petits consortiums autour d'un projet.

Pour cela elle pourra s'appuyer notamment sur l'initiative du Cluster Maritime Français qui vise à mettre en place un Institut de Transition Eco Énergétique du Maritime (IT2EM) qui lui-même s'inscrit dans l'initiative T2EM lancée par le CMF en 2019 et mentionnée dans l'avenant au contrat de filière qui sera signé en 2021.

Cette structure en cours de montage est à visée nationale et se donne en effet pour objectif de mettre en œuvre les programmes de recherches voulus par les industriels du secteur, incarnant les objectifs des feuilles de route de la filière de manière à optimiser les besoins de financement, à développer des synergies entre acteurs industriels et à accélérer la décarbonation du maritime. Cette feuille de route sera largement utilisée pour bâtir la stratégie de l'IT2EM, et les résultats qui sortiront de ses travaux permettront à leur tour de mettre à jour cette feuille de route.

Pour assurer cette cohérence, un certain nombre d'acteurs sont communs aux deux actions (Chantiers de l'Atlantique, Naval Group, Bureau Veritas, Pôle de compétitivité Mer Bretagne Atlantique, IRT Jules Verne...).

Sur le plan du besoin de R&D les thèmes à mettre en œuvre pour lever les verrous mentionnés dans cette feuille de route sont les suivants :

2. Calendrier

Ce calendrier porte sur les programmes que nous pouvons envisagés autour des verrous décrits dans la feuille de route et tenant compte de la maturité des technologies.

THEMES

Time To Market
<3ans / 3-5 ans / >5 ans

Réduction des émissions de GES de l'énergie consommée

Energie Stockée neutre en carbone ou décarbonée	> 5ans
remplacer le Heavy fuel Oil	<3 ans
Carburants alternatifs (Pile à Combustible et Combustion)	> 5 ans
Hydrogène	
Ammoniac	
Methnaol / Ethanol	
Bio Fuel (BioGNL / Bio Diesel)	
Stockage de l'énergie à bord	> 5 ans
batteries/condensateurs	
e-Fuel (Hydrogène / Ammoniac / méthanol / ethanol) - BioGaz	
Sécurité des systèmes de stockage	
Systemes propulsifs utilisant une énergie renouvelable à bord	<3 ans
Velique	
Autres source d'énergie renouvelable et production d'énergie à bord	
Hybridation	3- 5 ans
Intégration de système zero émission à bord	
Développement d'EMS (Energy Management System)	
Outils d'aide à la décision pour choix de type d'hybridation (selon usages cibles).	
Électrification des quai	3 - 5 ans
Traitement des émissions GES et polluants	>5 ans
Capture et stockage CO2	
Réduction fuite de méthane	
Traitement des émissions et polluants	

Efficacité énergétique

Design Optimal et technologies	3 - 5 ans
Réduction de la consommation énergétique	
conception des navires	
Récupération et gestion optimisée de l'énergie	
Excellence opérationnelle	< 3 ans
opération des navires (optimisation de sprofil des missions/ navire apprenant - IA)	
Formation des navigateurs à l'écogestion des navires / au pilotage des navires à propulsion innovantes (Voile, hybride etc...)	

Mutation de la flotte existante

Refit / MCO	3 - 5 ans
évolution cyclique des navires	
Refit de navires conventionnels en navire zero emission	

Eco-Conception

Limitation de l'empreinte environnementale de la phase de conception	> 5ans
Limitation de l'empreinte environnementale des la pahse de conception	
biocompatibilité / Biosourcinf	
biosourcing	
recyclabilité	
réduction de l'empreinte sonore sous marine et et aeriene.	

Figure 3 : tableau des budgets et délais de mise en œuvre

3. Indicateurs de performance

L'évaluation du suivi de la feuille de route pourra se faire à travers les indicateurs de performance suivants :

- Nombre de projets d'innovation réalisés en lien avec la thématique Greenship.
- Nombre d'entreprises impliquées sur les thématiques Greenship.
- Délai de mise sur le marché des briques technologiques mentionnées dans cette feuille de route
- Date de mise à l'eau du premier bateau français zéro-émission par segment de navire
- Nombre d'emplois créés en lien avec la thématique Greenship
- Evolution de flotte et des émissions associées