

Un livre blanc proposé par

Wind Ship
association



LA PROPULSION DES NAVIRES PAR LE VENT

Des technologies prêtes à décarboner le transport maritime
Une opportunité industrielle pour la France

Ce livre blanc est réalisé avec le soutien
financier de l'ADEME et de



Première publication : Janvier 2022
Édition mise à jour : Juin 2022

Table des matières

Avant-propos	4
Présentation de Wind Ship	6
Synthèse	8
01 - Décarboner le transport maritime	16
Poids du transport maritime dans l'économie mondiale	16
Impact climatique et environnemental du transport maritime	17
Autres impacts environnementaux du transport maritime	18
Institutions et réglementation	19
Responsabilité environnementale des entreprises	21
Que peut-on attendre des carburants alternatifs ?	23
02 - Les modes de propulsion par le vent au XXI^e siècle	28
Quelques repères sur la navigation à la voile	28
Un foisonnement d'innovations technologiques	29
Le vent, une extraordinaire source d'énergie pour le transport maritime	42
Une réponse sérieuse à l'impératif de décarbonation	48
Puissance propulsive et conduite des navires	50
Retours d'expérience	52
03 - Quand le transport maritime renoue avec la propulsion par le vent	55
Les aspects opérationnels	55
Le processus d'intégration des systèmes aux navires	58
Le choix de la technologie	59
Évolutions à prévoir	63
04 - Perspectives de développement industriel	66
Un très fort potentiel	66
Une opportunité pour la France	68
Un financement complexe des navires	75
Pistes pour structurer et accélérer le développement de la propulsion par le vent	78
Annexes	80
Présentation des membres Wind Ship	81
Annexes techniques	88
Bibliographie	101
Notes & sources complémentaires	104

Avant-propos

Développer un transport maritime propre et décarboné constitue l'un des enjeux majeurs de cette décennie pour répondre à l'accord de Paris de 2015 : contenir le réchauffement climatique à +2°C et si possible +1,5°C par rapport au niveau préindustriel. La France a été à l'initiative de la déclaration Tony de Brum en 2017 pour fixer des objectifs ambitieux au transport maritime afin de l'inclure dans cet engagement planétaire.

Une proposition de valeur est à même d'enclencher un cycle vertueux: utiliser systématiquement l'énergie du vent pour propulser les navires. La navigation à voile est pratiquée depuis plus de 7 000 ans. Elle s'appuie sur une ressource en énergie intégralement renouvelable et largement disponible sur la planète. Utilisant jusque-là toutes sortes de voiles tissées en matières souples, la marine du XXI^e siècle réinvente la navigation marchande à voile avec de nouvelles technologies et de nouveaux matériaux qui associent encore mieux les lois de l'aérodynamique avec celles de l'hydrodynamique. Ces technologies peuvent être déployées sur la majorité des navires existants, et trouvent aisément leur place lors de la conception de nouveaux navires.

Pourtant, les plans d'innovation dans le secteur du transport maritime sont presque exclusivement tournés vers la recherche du carburant vert de demain qui alimentera les moteurs de nos navires dans un système business-as-usual. Cette « monoculture » du moteur à combustion interne écarte de fait toute réflexion possible sur une source d'énergie alternative comme la propulsion par le vent.

Wind Ship vous propose de découvrir grâce à ce livre blanc les fondamentaux de la propulsion des navires par le vent : une proposition technologique crédible, performante et disponible dès aujourd'hui pour assurer la durabilité du transport.

Florent Violain, Président
Lise Detrimont, Déléguée générale
Association Wind Ship



« Tout ça, c'est du vent... » Jamais cette expression ne m'a paru aussi incongrue. Dans un monde qui nous est devenu si complexe la simplicité est une pépite rare. L'évidence est pourtant là : le vent est partout, gratuit, renouvelable, sans impact. L'humanité a exploré, prospéré et écrit l'Histoire Maritime grâce au vent, sauf le temps d'une petite parenthèse «fossile»... Certes le challenge technique peut paraître ardu, mais comme dans bien d'autres domaines, il est sans doute plus facile à dépasser que le défi culturel et le changement de regard qui s'impose globalement à nous aujourd'hui. Bravo à Wind Ship pour ce livre blanc comme l'écume des nouveaux sillages possibles pour demain.

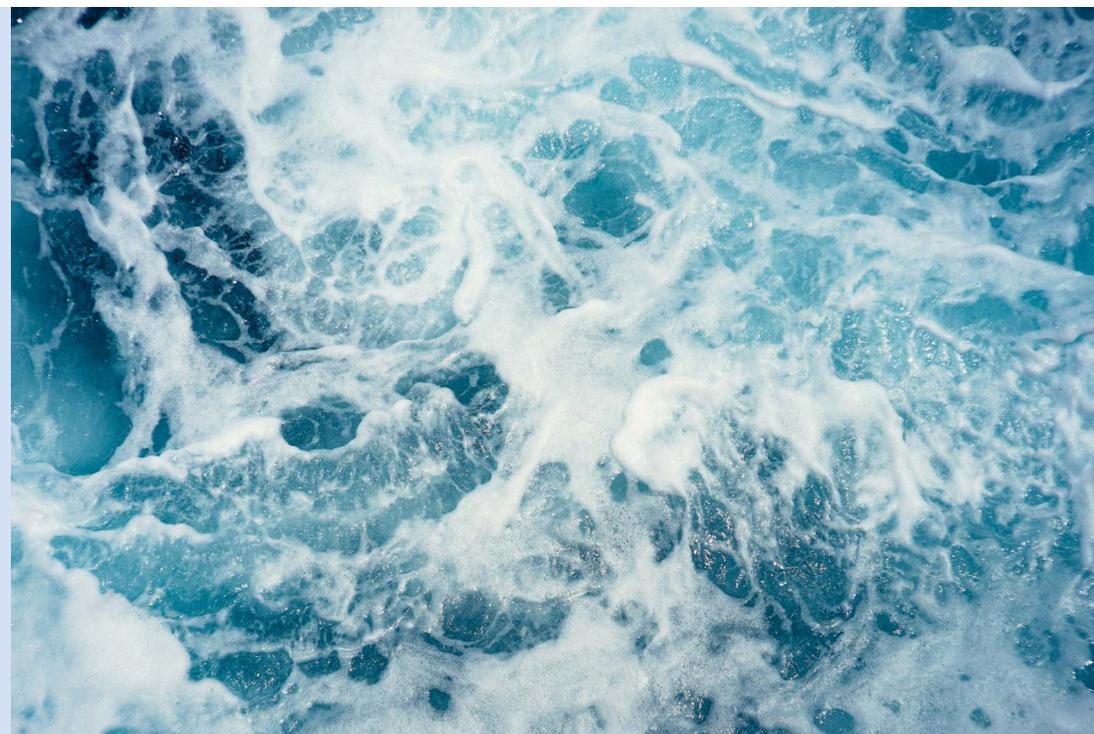
Roland Jourdain,
Navigateur

À qui s'adresse ce livre blanc ?

Ce livre blanc présente des clés de lecture de la propulsion des navires par le vent :

- **À ses usagers directs** : armateurs, transporteurs, commissionnaires, acteurs portuaires
- **À ses bénéficiaires indirects** : utilisateurs de transport maritime et acteurs de la distribution
- **Aux acteurs des services associés** : assureurs, certificateurs, financeurs, investisseurs
- **Aux facilitateurs** : élus, membres du gouvernement et des administrations, ONG.
- À tous ceux qui souhaitent s'informer sur l'opportunité d'une nouvelle voie pour un transport propre et décarboné, qui s'ancre dans les territoires et renouvelle le lien entre le citoyen, le marin et la mer.

Ce livre blanc s'appuie sur les connaissances de Wind Ship et de ses membres et sur les expériences et témoignages de nombreux acteurs du monde maritime, des collectivités et administrations territoriales, des institutions et écoles, des parties prenantes de l'innovation, de l'industrie, des services associés et bien sûr des porteurs de projets.



Nous tenons à remercier les partenaires qui nous ont permis de réaliser ce travail : **l'ADEME, Nantes Métropole, la Région Bretagne, la CARENE et le Cluster Maritime Français**. Nous remercions aussi **Armateurs de France, le Groupement des Industries de Construction et Activités Navales, le Pôle Mer Bretagne Atlantique et Bureau Véritas** pour les échanges réguliers que nous avons avec eux. Nous remercions également les nombreuses personnes qui ont répondu à nos sollicitations pour cet opus ou qui nous ont guidé par leurs réflexions et leurs mises en contact.

Présentation de Wind Ship

Wind Ship est une association française créée en 2019 pour accélérer à son échelle et par ses actions la transition écologique du maritime grâce au développement et au déploiement de la propulsion des navires par le vent.

Wind Ship œuvre à l'échelle locale, nationale et internationale pour positionner ces solutions comme une voie majeure et déjà disponible afin de décarboner le transport maritime et la pêche.

Localement, Wind Ship participe à la transformation des modes de transport et de consommation des territoires :

- Par la structuration d'une filière industrielle et technologique locale pour un transport maritime « propre », apportant de nouvelles opportunités aux industries existantes ;
- Par le soutien à des modèles économiques réduisant les distances et ouvrant de nouvelles connexions entre les territoires ;
- Par des propositions de valeurs permettant aux citoyens de réduire leurs impacts et de satisfaire leur responsabilité sociétale.

Au niveau national, Wind Ship participe à la visibilité des solutions et accompagne les décideurs et usagers dans leur adoption afin d'en accélérer le développement

et le déploiement. Wind Ship renforce la représentation nationale de la propulsion par le vent pour qu'elle soit pleinement considérée comme un pilier de la décarbonation et qu'elle s'appuie sur une filière nationale structurée et compétitive.

Au niveau international, Wind Ship coordonne le hub Europe Atlantique de **l'International WindShip Association**, un réseau de 150 membres et supporters présent auprès de l'OMI et de l'Union Européenne et à l'origine de la **Decade of Wind Propulsion**.



Wind Ship réunit des entreprises pionnières de la propulsion par le vent et des représentants de la société civile qui souhaitent soutenir le développement de ces solutions.

Ce document a été rédigé par les membres de l'association Wind Ship, qui s'investissent pour promouvoir l'usage du vent dans la propulsion des navires de commerce. Les contributeurs sont donc des porteurs de projets utilisant ou prévoyant d'utiliser ces technologies, des développeurs de ces technologies, des bureaux d'ingénierie et architecte naval et des chantiers.

A travers ce livre, l'association souhaite contribuer à une meilleure connaissance des possibilités que peut apporter l'usage de l'énergie du vent sur les navires en proposant de découvrir les fondamentaux de la propulsion des navires par le vent.





L'intérêt de l'ADEME pour le développement de propulsions véliques adaptées à la marine marchande remonte à plus de 10 ans, ayant identifié la place significative que ces systèmes véliques sont en droit de prendre dans la décarbonation tant attendue du transport maritime. Il serait caricatural de considérer le retour sur les océans de la marine à voiles comme l'apanage de quelques doux rêveurs.

Les premiers projets proposés à l'ADEME ont été portés par des entreprises et architectes navals bien implantés dans le domaine du nautisme et de la compétition, désirant transposer les acquis techniques et scientifiques obtenus de la course au large et de la voile de compétition vers les navires de commerce. Le programme des investissements d'avenir via l'ADEME et aussi l'ADEME directement ont ainsi permis de financer 10 projets d'innovations et une thèse pour un montant d'aides de 14 M d'euros, avec des succès déjà probants. Des navires de commerce à propulsion vélique sont déjà en exploitation et des démonstrateurs de technologies innovantes (des ailes rigides articulées, des kites et ailes captives, des ailes à profils épais, des inversions de profils), ont montré le formidable potentiel d'innovation

de l'écosystème français. L'ADEME est fière et heureuse d'avoir pris sa part dans l'amorçage de cet écosystème et son investissement se poursuivra en 2022. Le vent est très clairement en train de tourner, en faveur du transport maritime. Cependant, à l'évidence, ce soutien à l'innovation ne suffit pas pour accélérer le déploiement sur l'ensemble de la flotte de commerce. Des doutes et des interrogations demeurent, légitimes et souvent par méconnaissance.

Il est donc apparu naturel à l'ADEME de soutenir l'association Wind Ship et ses adhérents dans ce travail de rédaction d'un livre blanc. Il sera essentiel au partage des connaissances parmi les parties prenantes et à l'identification des leviers à actionner pour dissiper les doutes et répondre à l'ensemble des questions. Déjà, des compléments sont identifiés sur des sujets spécifiques (assurances, prise en compte dans la chaîne logistique, formation des marins) et seront développés prochainement.

*Philippe Cauneau,
ingénieur, service Transport et Mobilités
ADEME*

Synthèse

Exploiter le vent pour propulser la flotte des navires marchands est une solution déjà disponible pour améliorer significativement l'empreinte carbone de ce secteur. La France possède une avance technologique et un écosystème favorable qui pourraient se transformer rapidement en une filière industrielle d'exception grâce à un soutien public et privé approprié. La course pour décarboner l'économie étant engagée mondialement, de nombreux acteurs en Asie et en Europe du Nord se positionnent sur la propulsion des navires par le vent. L'offre française doit donc se démarquer rapidement et fortement pour être créatrice d'emplois et contribuer significativement à un transport maritime plus propre.

Pourquoi est-il important de décarboner le transport maritime ?

Le transport maritime constitue le maillon essentiel de l'organisation économique mondiale. En 2019, onze milliards de tonnes de marchandises ont traversé les océans sur quelque 100 000 navires, un trafic en augmentation constante, permise notamment par la taille croissante des navires. Si cette massification des volumes fait du maritime l'un des modes de transport les moins émetteurs de gaz à effet de serre par unité transportée, sa facture climatique globale grimpe en raison de la croissance des échanges. Il est à l'origine de 3% des émissions de CO2 mondiales soit 1 milliard de tonnes. Si rien n'est fait, les émissions de CO2 "maritime" pourraient encore augmenter de 50 % d'ici 2050 par rapport à 2018. À quoi s'ajoutent nombre d'autres pollutions et atteintes à la biodiversité marine.

Les États ont pris conscience de cette situation et se sont résolus, à travers l'instance compétente en la matière qu'est l'Organisation maritime internationale (OMI), de diminuer de 50% les émissions de gaz à effet de serre de la flotte mondiale d'ici 2050. Cependant, remplacer 300 millions de tonnes annuelles de carburant fossile par des sources d'énergie plus propres nécessite d'opérer d'immenses changements dont le coût est extrêmement important et se répercutera nécessairement sur le coût du transport. Le cadre réglementaire international se construit petit à petit, mais les moyens financiers, technologiques et logistiques de ce changement ne sont pas encore opérationnels.

Quel peut-être le rôle de la France dans ce domaine ?

C'est la convention internationale des Nations unies sur le droit de la mer qui fixe les droits et les devoirs des États. Ces derniers négocient les accords internationaux sur la prévention de la pollution des navires dans le cadre de l'OMI.

La France dispose de peu de marge de manœuvre pour agir directement même dans les eaux sous sa souveraineté ou sa juridiction. Toutefois, c'est elle qui fixe les sanctions en cas de non-respect des règles internationales, ce qui lui permet de les rendre très dissuasives en matière d'émissions atmosphériques.

Elle peut aussi rendre son pavillon particulièrement attractif pour les navires propres. En tant qu'État côtier, elle pourrait réglementer dans une certaine mesure le passage dans ses eaux territoriales pour préserver l'environnement, mais c'est la Commission européenne qui est compétente en la matière. Celle-ci a privilégié un système d'indicateurs et de quotas d'émissions de gaz à effet de serre qui s'imposeront aux armateurs d'ici 2023 dans l'espace maritime européen.

La France représente le deuxième territoire maritime mondial. A son échelle, elle peut participer à accélérer l'évolution des modes de consommation en proposant des solutions concrètes de réduction des émissions, par exemple une logistique maritime décarbonée sur le segment courte distance. Pour cela, elle peut s'appuyer sur les sociétés

françaises qui proposent déjà des solutions pour réduire les émissions du transport maritime en exploitant le vent comme propulsion.

Pourquoi les carburants non fossiles ne sont qu'une partie de la solution ?

La flotte mondiale utilise aujourd'hui le fioul lourd, résidu pétrolier à la fois très peu cher et exonéré de taxe, aux performances énergétiques inégalées. Pour le remplacer, les regards sont désormais tournés vers les carburants décarbonés. Les biocarburants sont déjà un peu utilisés, dans les limites étroites que leur laissent la réglementation et la concurrence d'autres usages. Les plus attendus sont les carburants de synthèse produits à partir d'électricité issue d'énergie renouvelable – souvent en utilisant l'hydrogène comme vecteur d'énergie.

Outre que ces carburants ne sont pas encore au point, ils sont moins efficaces que le pétrole et présentent pour certains des risques élevés en matière de sécurité. Leur production peut être fortement émettrice de gaz à effet de serre. Par ailleurs, leur usage par le transport maritime entre en concurrence avec d'autres besoins énergétiques.

Enfin, et surtout, leur usage multipliera par un facteur de 2 à 8 le coût de l'énergie à bord, qui représente déjà 20 % à 35 % des charges annuelles des armateurs. Aussi est-il essentiel de combiner plusieurs mesures pour réussir une transition écologique rapide du transport maritime. La première consiste à faire diminuer le besoin en carburant. C'est justement

ce que permet la propulsion par le vent, qui contribue pour une part significative au déplacement du navire, en étant complémentaire d'une motorisation utilisant toute nature de carburant.

En quoi consistent les technologies de propulsion par le vent ?

De nouvelles technologies sont aujourd'hui développées et utilisées pour renouer avec la propulsion des navires par le vent, une pratique vieille de plus de 7 millénaires. Elles s'appuient dorénavant sur un croisement d'innovations dans différents domaines, comme la construction navale et le nautisme mais aussi la course au large, l'aéronautique et le numérique.

Ces technologies se déclinent en de multiples variantes de voiles ou d'ailes, en rotors ou profils aspiré, et enfin en kites. Elles se différencient par leur position (sur le pont ou aérienne), leur forme, leur rigidité, leur automatisation, et permettent d'équiper la quasi-totalité des navires.

Un avantage majeur est qu'elles peuvent être installées sur des navires existants : la décarbonation de la flotte peut donc commencer sans attendre son renouvellement. Elles peuvent fonctionner seules ou en complémentarité avec une motorisation classique, ce qui leur permet de s'adapter aux contraintes économiques actuelles du transport maritime, en termes de vitesse notamment.

Quels sont les avantages du vent pour le transport maritime ?

Le vent est une source d'énergie propre, immédiatement disponible en abondance sur la quasi-totalité du globe, inépuisable et inaliénable. Grâce aux ailes ou aux voiles, le vent est utilisé directement par le navire sans perte de rendement. Son utilisation en mer ne concurrence aucun usage terrestre. Il est devenu prévisible avec suffisamment d'acuité pour rendre son usage compatible avec une activité commerciale, d'autant que le caractère mobile du navire lui permet d'aller « chercher son vent » et d'optimiser son trajet grâce aux outils de routage. L'utilisation du vent pour propulser un navire ne présente aucune externalité négative pour l'environnement, ni de risque non maîtrisé pour l'équipage. Au contraire, la propulsion par le vent permet également de réduire les bruits sous-marins en réduisant l'usage de la propulsion motorisée.

Pourquoi la propulsion par le vent est-elle une solution sérieuse ?

L'énergie du vent propulse un navire de taille moyenne avec suffisamment de puissance pour constituer son moteur principal sur des routes adaptées, comme les transatlantiques. Selon les tailles et types de navires, elle est une source de puissance complémentaire permettant d'abord une stabilité du coût du transport pour la partie assurée grâce à l'énergie du vent. Ensuite, la propulsion par le vent offre de réels gains

économiques en exploitation de par les économies en carburant : de 5% à 20% sur des navires existants, de plus de 30% sur des nouveaux navires, et jusqu'à 80% dans le cas d'une propulsion principale par le vent sur une ligne favorable pour des navires de taille moyenne et transportant des cargaisons de faible densité.

Ces nouveaux systèmes propulsifs s'adaptent à presque tous les types de navires, en construction neuve et en rétrofit, avec peu d'impacts. Quinze premiers grands navires de charge (pétrolier, vraquier, ferry, cargo polyvalent, roulier et navire de pêche) ont déjà été équipés de technologies de propulsion par le vent et sont actuellement en test. Leurs zones de navigation sont variées, depuis les mers du Nord et l'Atlantique jusqu'au Pacifique et à l'Océan Indien. Le premier navire neuf intégrant directement lors de sa construction un système de propulsion par le vent de nouvelle génération a été le navire E-Ship 1, propulsé en partie par 4 rotors flettner, il opère commercialement depuis 2010. Le prochain, un roulier de 121 mètres destiné à des trajets transatlantiques équipé de 4 ailes couvrant chacune 363m², sera mis à l'eau fin 2022.

La propulsion par le vent est-elle reconnue par les instances étatiques et professionnelles du transport maritime ?

La propulsion par le vent répond aux textes réglementaires en vigueur, d'autant mieux que l'OMI met à jour ses guides afin de mieux la prendre en compte comme dans les indices d'efficacité énergétique qui

caractérisent les navires. Des outils et services d'aide à la décision se développent rapidement pour faciliter les choix des armateurs et l'intégration des technologies sur un navire existant ou à construire. Les grandes sociétés de classification ont publié ou mis à jour leur référentiel traitant des navires propulsés par le vent. L'administration maritime française travaille aujourd'hui au cas par cas pour faire évoluer la réglementation nationale et a déjà autorisé la mise en service de navires propulsés par le vent sous pavillon français. Les résultats concrets des premières expériences font l'objet de publications et de vérifications par une tierce-partie, renforçant petit à petit la crédibilité des solutions. Les assureurs devraient bientôt proposer des polices spécifiques voire des primes incitatives pour la propulsion par le vent.

Quel est le potentiel de développement des technologies de propulsion par le vent ?

Les technologies de propulsion par le vent sont disponibles dès aujourd'hui pour être déployées sur les navires existants ou intégrées à la conception de nouveaux navires. C'est ce qui a permis à deux études prospectives réalisées l'une pour la Commission européenne et l'autre pour le ministère des Transports du Royaume-Uni, d'estimer que jusqu'à 10 000 navires pourraient être équipés d'ici 2030 et jusqu'à 45% de la flotte mondiale d'ici 2050. Le nombre de grands navires de charge équipés aujourd'hui devrait doubler d'ici 2023.

La propulsion par le vent est particulièrement efficace pour les navires de taille moyenne navigant à une vitesse modérée. Or ces derniers devraient reprendre du service à la faveur d'une prise de conscience des effets pervers de la division internationale du travail. La pandémie de COVID 19 a en effet montré la dépendance de nombre de pays, dont la France, par rapport aux lieux de production de biens stratégiques. D'où la volonté de relocaliser certaines productions industrielles à proximité. De plus, le recours aux énergies renouvelables aux dépens des énergies fossiles pourrait rebattre les cartes des principales routes maritimes au profit des échanges régionaux. Ainsi, l'organisation actuelle des transports maritimes, massifiés, rapides, concentrés sur quelques routes principales et entre les mains de grands opérateurs, pourrait être bousculée par l'émergence de lignes secondaires assurées par des navires moins grands. Enfin, les territoires insulaires, particulièrement vulnérables au changement climatique et aux aléas de l'économie mondiale, ont un intérêt majeur à disposer d'une flotte utilisant l'énergie gratuite et abondante du vent.

Par ailleurs, les grandes entreprises affichent de plus en plus leur volonté de décarboner leur chaîne logistique dans le cadre de leur politique de RSE. Certaines sont coalisées dans la CoZEV, organisation internationale visant à armer des navires fortement décarbonés. En France, l'Association des utilisateurs du transport de fret soutient la démarche de quatorze entreprises françaises souhaitant utiliser un transport principalement propulsé par le vent en 2025. Une quinzaine d'entreprises françaises ont par ailleurs conclu des contrats avec des transporteurs utilisant la propulsion par le vent.

Où en est la fabrication des systèmes aujourd'hui ?

On recense une trentaine de développeurs de technologies dans le monde, dont une dizaine en France. Les projets français ont déjà un niveau de maturité élevé puisque les deux tiers de ces équipementiers ont installé des démonstrateurs à terre ou mené des tests en mer. Deux usines de production sont déjà en construction. Les entreprises ont commencé à se rapprocher d'acteurs œuvrant sur les plateformes offshore et dans l'aéronautique, deux domaines dont les savoir-faire sont utiles pour l'intégration des systèmes de propulsion par le vent sur les navires ou pour leur maintenance. Il s'agit désormais de convaincre les armateurs d'équiper leurs navires de ces nouvelles technologies pour en valider les performances.

Le financement de ces projets est un enjeu majeur, sachant que les équipementiers sont pour la plupart des start-up. L'ADEME a soutenu les phases de recherche et de développement initiales, mais les besoins en trésorerie sont élevés pour construire les prototypes et, à ce jour, la filière est encore peu présente à l'esprit des acteurs de la "finance verte". Cependant, la situation pourra évoluer à la faveur du renchérissement et de la volatilité des prix des carburants (fossiles ou non) et de l'entrée du transport maritime dans le système européen d'échange des quotas d'émissions, qui mettront en lumière l'intérêt du vent comme énergie alternative.

Quels sont les atouts de la France en regard de ce potentiel ?

La France métropolitaine et outre-mer dispose d'atouts considérables pour jouer un rôle significatif et à l'échelle internationale dans l'émergence d'une flotte décarbonée en partie grâce au vent. Les équipementiers français ont déjà créé plus de 180 emplois directs. De jeunes armements développent des lignes maritimes décarbonées par le vent, empruntant des routes en haute mer ou cabotant le long des côtes, au départ de ports de métropole ou d'outre-mer, pour le transport de fret et de passagers. Des bureaux d'ingénierie, cabinets d'architectes, sociétés de sous-traitance industrielle et chantiers navals ont dédié des moyens aux projets de ce secteur. Une grande partie de ces acteurs est déjà fédérée au sein de Wind Ship et de l'International Windship Association, permettant ainsi d'organiser un échange avec tous les interlocuteurs de la filière, publics ou privés.

Ces entreprises s'implantent dans les territoires volontaires, dont l'écosystème industriel apporte des savoir-faire essentiels issus de l'aéronautique, la construction navale, le nautisme et le numérique. C'est le cas de la façade atlantique, où les collectivités territoriales leur apportent par ailleurs un soutien précieux: pôle dédié aux activités nautiques et maritime à Nantes Métropole, centre industriel lié aux nouvelles propulsions pour la CARENE (Saint-Nazaire agglomération), animation de la filière pour la Région Bretagne, par exemple.

Comment soutenir le développement de la filière ?

L'implication de tous les acteurs concernés, qu'ils soient privés (clients, armateurs, chargeurs, investisseurs et financeurs) ou publics (État et collectivités territoriales) sera déterminante pour accélérer le développement d'une filière dont l'intérêt général est manifeste.

Elle doit permettre de :

- Faire connaître la propulsion par le vent et ses avantages
- Démontrer son efficacité et la faire reconnaître par de tierces parties
- Inciter les utilisateurs à s'équiper et faciliter leur investissement
- Financer les projets industriels et accélérer le retour sur investissement
- Favoriser la création d'écosystèmes favorables à la propulsion par le vent à l'échelle nationale (métropole et outre-mer) et dans les territoires pionniers.



Quand la passion et l'innovation s'allient au passé pour tracer les chemins de l'avenir

La filière "propulsion par le vent" porte en elle la synthèse d'un savoir-faire complet et ancestral de toute la filière maritime. De la conception des voiles, des mâts et des systèmes dans leur ensemble, au design des navires et à leur opération intelligente, c'est le lien entre l'excellence académique, scientifique et industrielle de la course au large, du nautisme, des chantiers et équipementiers de la navale, du numérique et des matériaux, sans oublier nos sociétés de classe, assureurs et financeurs qui accompagnent le déploiement de ces technologies, ainsi que les écoles pour la formation des marins de demain.

Solution pérenne de la transition énergétique du maritime et par là des chaînes logistiques et de mobilité, la propulsion par le vent ne demande désormais qu'à être encouragée pour passer de simulations et campagnes d'essais à des navires concepts qui vont valider la modélisation des systèmes énergétiques avec le vent et ouvrir les marchés.

La France, pionnière sur ces technologies, doit profiter de son avance pour développer une industrie non pas nouvelle mais renouvelée et renforcée.

En hybridation avec de nouvelles énergies et technologies, le vent ouvre la voie à des mix énergétiques qui ne seraient possibles sans sa contribution. En effet la part de carburant embarqué diminuée grâce aux apports du vent permettra certainement d'intégrer plus facilement des énergies et technologies plus volumineuses qui ne sont pas adaptées aux navires actuels.

En propulsion principale ou auxiliaire, dans le sillage des premiers

voiliers en opération et navires bientôt équipés, les trois années qui s'ouvrent vont être déterminantes pour embarquer différentes solutions sur de premiers segments de flotte et amorcer l'industrialisation. Ensuite, l'adaptation à d'autres segments de flotte moins immédiatement identifiables compte tenu des spécificités opérationnelles et techniques de ces types de navires se fera progressivement.

Au-delà des nécessaires transformations, c'est toute une communauté qui amène à repenser le design des navires de demain, soutenue par les armateurs et des chargeurs désireux de repenser la façon de transporter, de produire et de consommer.

La Filière peut compter sur le soutien de toute la communauté maritime, comme elle a pu compter sur la dynamique T2EM du Cluster pour valoriser ses atouts et en faire une priorité industrielle dans l'ambition nationale de navires 0 émission et des objectifs internationaux de corridors verts annoncés à la COP26.

Je forme le vœu que les armateurs français deviendront dans ces 3 années à venir, depuis l'Outre-mer comme depuis l'Hexagone, sur les différentes lignes du globe, des ambassadeurs d'une excellence technologique et d'une conscience profonde, au service de l'environnement, de notre Planète et de notre Humanité.

*Frédéric Moncany de Saint-Aignan
Président du Cluster Maritime Français*

01 Décarboner le transport maritime

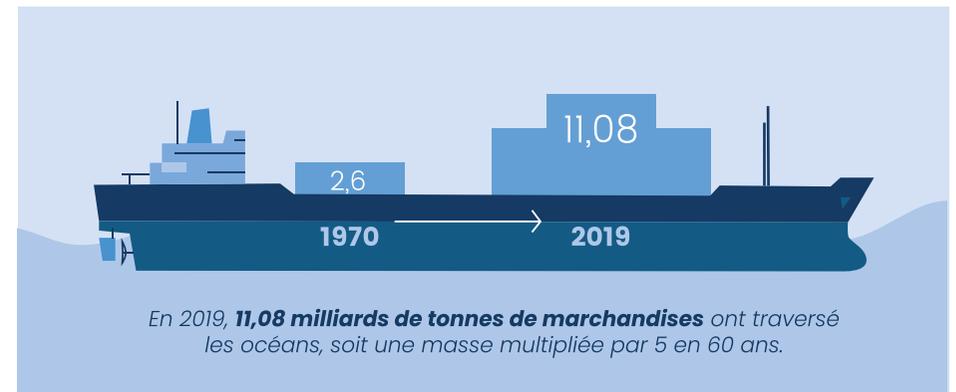
Poids du transport maritime dans l'économie mondiale

Le monde actuel vit au rythme des échanges commerciaux liés à la production et à la distribution des marchandises ... et en dépend entièrement

La pandémie de COVID-19 a montré l'interdépendance des pays et de leurs habitants aux circulations liées à la production et à la distribution des biens dans le monde. En effet, l'intensification depuis les années 1990 des stratégies d'externalisation des grandes firmes a abouti à l'éclatement et à la dispersion des différentes activités participant à la création de valeur (source :¹). C'est l'explosion à l'échelle mondiale des chaînes de valeur. Il est devenu bien plus intéressant de spécialiser des productions dans certaines parties du monde où la main d'œuvre et les matières premières sont à bas coût, et de faire transiter les composants d'un bout à l'autre de la planète vers des chaînes d'assemblage et de transformation, étapes qui représentent la moitié des échanges commerciaux dans le monde – puis les produits finis vers la distribution.

Le transport maritime constitue un maillon essentiel mais vulnérable de l'organisation économique du monde, en assurant la circulation des biens intermédiaires et finaux de consommation courante : nourriture,

vêtements, meubles, voitures, produits médicaux, équipements high-techs... L'énergie fossile, charbon, pétrole, gaz, ainsi que les produits agricoles bruts et minerais sont aussi invariablement acheminés par voie de mer.



Explosion du transport de marchandises en 50 ans

Le blocage du canal de Suez par l'échouement du porte-conteneur Ever Given du 23 au 29 mars 2021 a provoqué une désorganisation du transport maritime mondial dont le coût a été estimé à 6 à 10 milliards d'euros par jour. Cet événement a mis en avant la dépendance du commerce et de l'industrie européenne notamment aux productions manufacturées asiatiques, ainsi que les limites de la course au gigantisme, preuves supplémentaires de la vulnérabilité du transport maritime.

Impact climatique et environnemental du transport maritime

Une facture climatique qui croît avec l'intensification des échanges

Mode de transport le moins émetteur de gaz à effet de serre par unité transportée, le transport maritime voit pourtant sa facture climatique augmenter en raison de l'intensification des échanges commerciaux. Le coût de ce transport est extrêmement faible grâce à la massification déployée à l'aide de grands navires propulsés jusqu'ici par un résidu pétrolier à bas coût et exonéré de taxe, le fioul lourd.

Aujourd'hui (2020), 98 140 navires de jauge brute* supérieure à 100 sillonnent les océans (cf. annexes techniques). Cela représente une consommation annuelle de carburant de près de 235 millions de tonnes de combustibles (source : ²). Les dépenses en carburant représentent 20 à 35% des coûts totaux annuels pour un armateur (source : ³).

Grâce à la taille atteinte par les navires et, en conséquence, leur meilleure efficacité énergétique, le transport maritime reste aujourd'hui proportionnellement l'un des moyens les moins émetteurs de gaz à effet de serre (GES) pour transporter les biens. Cependant, l'augmentation de la taille des navires, et la logique associée de hub, génèrent des impacts environnementaux et des coûts pour la société (cf. annexes techniques). Ceux-ci sont liés à l'adaptation des infrastructures – notamment lors des opérations de dragage dont les incidences peuvent être très significatives – et des équipements. Ils découlent aussi de l'allongement des phases de pré et post-acheminement.

Par ailleurs, les volumes transportés continuent de croître très rapidement. Le modèle de la société de consommation peine à laisser place à une société plus sobre et frugale. Or, la population mondiale estimée à 7,8 milliards d'êtres humains en 2021 (source : ⁴) devrait atteindre 8,9 à 10,5 milliards en 2050. Ponctuellement, le volume de marchandises transportées sera légèrement moins important en 2020 qu'en 2019, cependant les projections envisagent une augmentation annuelle de 4,8 % dès 2021 et les données récemment publiées dans le secteur des marchandises conteneurisées ont tendance à confirmer cette projection.

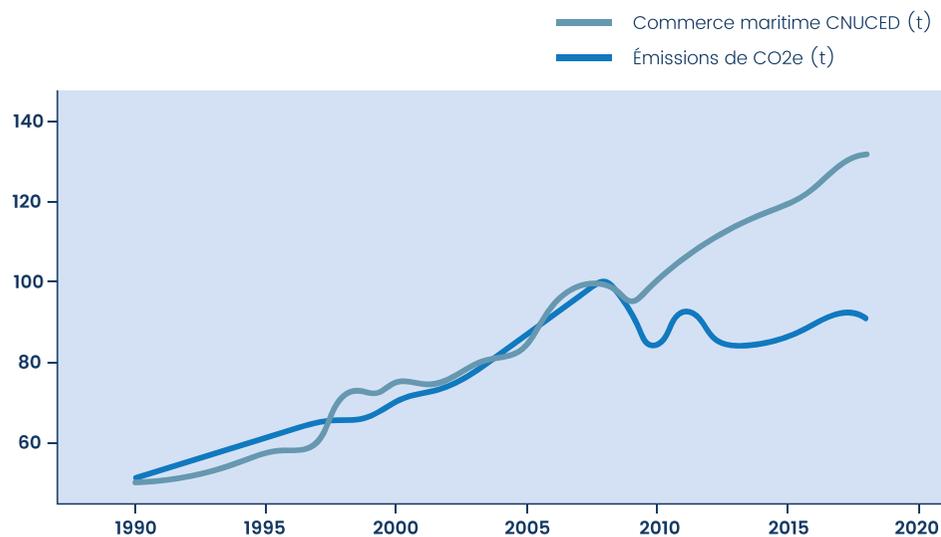
Aussi, l'impact total du transport maritime augmente-t-il globalement en pourcentage des émissions anthropiques. Le transport maritime international et national (source : ⁵) est à l'origine de 919 millions de tonnes de CO₂ (détail : ⁶) en 2018 soit une augmentation de 8,4 % depuis 2012. L'ensemble des transports maritimes (international, national et pêche) représente 1 076 millions de tonnes soit 2,89 % des émissions mondiales.

Au niveau européen, les émissions du transport maritime de 2018 représentent plus de 138 millions de tonnes de CO₂ (source : ⁷), soit plus de 3,7 % des émissions totales de l'Union européenne, et 15 % des émissions du transport maritime au total. Cela représente 44 millions de tonnes de carburant (dont 70 % de fioul lourd) soit près de 7 % de la demande totale en pétrole de l'Union européenne.

* La jauge brute des navires est une mesure du volume des espaces fermés de ceux-ci à l'aide d'une formule de calcul universelle introduisant un coefficient logarithmique. Cette jauge est donc exprimée dans le système de mesure universel (Universal Measurement System) mais n'a pas d'unité.

Un indicateur important : l'intensité carbone

Un indicateur spécifique a été développé pour traduire l'empreinte carbone de chaque navire : l'intensité carbone. Celle-ci traduit un volume de CO₂ émis par tonne de marchandise et par kilomètre (ou mille nautique) parcouru. Cette intensité carbone a été considérablement améliorée entre 2008 et 2019 (détail :⁸), de l'ordre de 20 à 30 % d'après les estimations publiées dans le cadre de l'OMI, grâce au remplacement des navires les plus anciens, à des mesures opérationnelles (réduction de vitesse) ou techniques, mais aussi en raison de l'introduction de navires encore plus grands (économies d'échelle). Les émissions de GES ont ainsi été temporairement décorréées de la croissance des échanges internationaux, lesquels ont doublé entre 1999 et 2018.



Évolution des émissions de GES du transport maritime depuis 1990

Cependant, cette amélioration a eu lieu pour moitié entre 2008 et 2012. Depuis 2015, elle est beaucoup plus lente (de l'ordre de 1 à 2 % par an) car les mesures les plus faciles et immédiates ont été mises en œuvre, et ce ralentissement ne pourra pas compenser la croissance du volume des échanges. Pour y parvenir, la conférence des Nations Unies pour le commerce et le développement (CNUCED) souligne qu'il est **"nécessaire d'opter pour des changements radicaux dans les technologies des moteurs et des carburants"**⁹. Sans cela, les projections de l'Organisation Maritime Internationale prévoient que les émissions de CO₂ issues du transport maritime pourraient encore augmenter de 50 % d'ici à 2050 par rapport à 2018.

Autres impacts environnementaux du transport maritime

Les gaz émis par la combustion des carburants fossiles ont aussi un impact sur la santé des personnes et sur l'environnement (annexe). En 2018, les émissions du transport maritime international, soit 10 millions de tonnes d'oxydes de soufre (SO_x) ou 5 à 10 % des émissions mondiales et 18 millions de tonnes d'oxydes d'azote (NO_x) ou 17 à 31 % des émissions mondiales, ainsi que 3 millions de tonnes de particules fines et ultrafines sont responsables d'une dégradation de la qualité de l'air notamment le long des côtes (détail :¹⁰).

La pollution sonore des océans commence à être suffisamment documentée et l'on estime aujourd'hui qu'elle a un impact majeur sur la vie marine en perturbant toutes les interactions dans le milieu marin. Le bruit généré par les navires et en particulier par la cavitation des hélices accroît la pression acoustique sur les écosystèmes marins et met en danger la biodiversité. Cet enjeu vient d'être inscrit au programme de travail de l'Organisation maritime internationale.

Le stockage de carburant à bord peut avoir des conséquences dramatiques pour l'environnement en cas d'accident amenant le fioul lourd contenu dans les réservoirs à se répandre dans les eaux. L'exemple le plus récent ayant touché l'espace maritime français (source : ¹¹) est celui du Grande America en avril 2019. Ce roulier de 214 mètres, a pris feu alors qu'il transitait dans le golfe de Gascogne et a coulé par 4600 m de fond, laissant 2200 tonnes de fioul lourd dans les soutes de l'épave, tandis qu'une partie s'est écoulée lors du naufrage.

Institutions et réglementation

Sous la pression des citoyens, de leurs gouvernements et des ONG, les règles sur les émissions des navires se durcissent, depuis l'échelon international jusqu'au niveau local.

Rôle de l'Organisation maritime internationale (OMI)

L'Organisation maritime internationale (OMI) est l'institution chargée par les Nations Unies d'assurer la sécurité et la sûreté des transports maritimes et de prévenir la pollution des mers par les navires. C'est en son sein que les États adoptent les règles qu'ils devront tous respecter ou faire respecter. L'OMI a été reconnue en 1997 en tant qu'organisation compétente en matière de gestion de la réduction des émissions maritimes de GES, contrairement aux autres secteurs industriels, qui sont sous la responsabilité directe des États qui les accueillent. Cette situation particulière est partagée par l'aviation civile internationale, placée sous la responsabilité de l'OACI.

L'annexe VI de la convention MARPOL

Les obligations liées à la prévention de la pollution atmosphérique et à la réduction des émissions de GES figurent dans la convention internationale pour la prévention de la pollution par les navires (convention MARPOL), dans son annexe VI entrée en vigueur en 2005 et révisée pour la dernière fois en 2011.

Cette annexe impose une amélioration énergétique des navires qui sont construits à partir de 2013 avec des seuils de plus en plus contraignants pour qu'en 2025, les navires soient 30% plus efficaces que ceux construits entre 2000 et 2010. L'annexe instaure aussi le suivi obligatoire de l'efficacité énergétique de chaque navire.

La stratégie de l'OMI

En 2018, l'OMI a adopté sa Stratégie initiale pour la réduction des émissions de GES des navires. Elle vise à réduire l'intensité carbone de chaque navire de 40 % d'ici 2030 et 70 % d'ici 2050. Elle vise également à faire diminuer les émissions de GES liées à l'ensemble de la flotte mondiale de 50 % d'ici 2050. L'année de référence est 2008.

La mise en œuvre de cette stratégie, dont le défi est immense, s'appuie notamment sur deux indices d'efficacité énergétique pour les navires existants et futurs de jauge brute supérieure ou égale à 400, appelés EEDI* et EEXI** (annexe). Les navires construits depuis 2013 doivent respecter un certain seuil, et tous les navires existants devront en respecter un aussi dès le 1er janvier 2023 – en l'absence de quoi, ils se verront notifiés d'une déficience réglementaire lors des contrôles dans les ports.

La société de classification American Bureau of Shipping estime que 85% des pétroliers et des vraquiers existants soumis à cette nouvelle norme auront des difficultés à respecter l'EEXI ¹², ce qui représente plus de 18 000 navires.

* EEDI : energy efficiency design index. ** EEXI : energy efficiency existing ship.

La stratégie de l'OMI repose également sur un indice d'intensité carbone appelé CII* pour les navires de jauge supérieure à 5000. Les plafonds à respecter seront progressivement abaissés entre 2018 et 2030, pour atteindre à cet horizon une diminution de 40 % par rapport à 2008.

Le Bureau Véritas estime quant à lui que, dans un scénario business-as-usual, 20% de la flotte actuelle des vraquiers concernée n'atteindra pas la note minimale requise d'ici 2023, et 55% en 2030. De manière plus générale, 55% de la flotte pourrait ne pas respecter les normes autorisées d'ici 2030.

L'utilisation de la propulsion par le vent permet d'améliorer ces indicateurs, voire de s'en libérer car les navires hybrides sont considérés comme à propulsion non conventionnelle et ne sont pas soumis à l'EEDI (source :¹³).

Par ailleurs, des discussions sont en cours à l'OMI sur la prise en considération de l'ensemble du cycle de vie de ces carburants, y compris les émissions de GES liées à leur production (« du puits au réservoir »), et plus seulement à leur combustion lors de leur utilisation (« du réservoir à l'hélice »).

Moyens d'action des États

La Convention internationale du droit de la mer, entrée en vigueur en 1994, définit le zonage des eaux – intérieures, territoriales, zone économique exclusive et haute mer – ainsi que les droits et devoirs des États sur ces espaces. Ces derniers peuvent agir en qualité d'État du pavillon**, d'État côtier et d'État du port.

* CII : carbon intensity indicator

L'État du pavillon

L'État du pavillon doit respecter les règles de l'Organisation maritime internationale ainsi que les règles européennes pour les États membres. Il peut agir au sein de l'Organisation pour faire évoluer ce droit international mais dispose de peu de marge de manœuvre pour fixer sa propre réglementation environnementale. Cependant, c'est lui qui fixe les sanctions pénales ou administratives applicables en cas d'infraction, ce qui lui permettrait d'être particulièrement sévère en matière de pollution de l'air par exemple.

Par ailleurs, un État est libre de fixer ses conditions d'immatriculation. L'attractivité d'un pavillon repose aujourd'hui fortement sur des coûts sociaux réduits et sur des avantages fiscaux, et la concurrence entre pavillons est forte. Mais le levier fiscal peut justement être utilisé par un État souhaitant attirer une flotte décarbonée sous son pavillon.

L'État côtier

L'État côtier peut réglementer le passage des navires dans ses eaux territoriales afin de préserver l'environnement, de prévenir, réduire et maîtriser sa pollution. Certains États ont utilisé cette compétence pour imposer des normes plus contraignantes sur les émissions des navires, comme la Chine, la Norvège ou la Californie par exemple. Ainsi, la Chine a imposé un taux de 0,5 % de soufre dans les carburants pour plusieurs zones de son littoral avant l'obligation instaurée par l'OMI au 1er janvier 2020. La Norvège impose une navigation zéro émission dans certains de ses fjords. La France ne pourrait pas adopter ce type de règles de

** L'État du pavillon est celui dans lequel un navire est immatriculé. Il lui assigne un port d'attache et exerce sa juridiction et son contrôle dans les domaines technique, administratif et social.

manière unilatérale car elles relèvent de la compétence de l'Union européenne, mais elle peut pousser activement celle-ci à renforcer ses normes.

Enfin, pour lutter contre les accidents maritimes, les États côtiers ont signé des Memoranda of Understanding qui permettent à l'État du port – celui dans lequel un navire va faire escale – de le contrôler même s'il ne bat pas son pavillon. Cela a conduit à une liste de navires interdits d'escale dans les ports des États signataires.

Pression de l'Union européenne

L'Union européenne a adopté en 2015 le règlement 2015/757, dit MRV, concernant la surveillance, la déclaration et la vérification des émissions de dioxyde de carbone du secteur du transport maritime. Il s'applique à tous les navires de jauge brute supérieure à 5000 voyageant au départ ou à destination d'un port relevant de la juridiction d'un État membre. Les compagnies ont l'obligation de surveiller les émissions de CO₂ de leurs navires et de les déclarer à la Commission et aux autorités de l'État de leur pavillon. Ce règlement prépare l'inclusion, d'ici 2022, du transport maritime dans le système d'échange des quotas d'émissions (SEQUE) de l'Union européenne. Cette mesure est assortie d'obligations visant à ce que les compagnies maritimes réduisent leur intensité carbone de 40% d'ici 2030.

En outre, le règlement FuelEUMaritime, sur les carburants alternatifs, propose d'établir un nouvel indice d'intensité en GES pour les navires de jauge brute supérieure à 5000, incluant les émissions liées à la production des carburants. Les valeurs à respecter, encore à déterminer, viseront à faire baisser progressivement cet indice pour atteindre -75% d'ici 2050 par rapport à 2020.

Les armateurs doivent trouver rapidement des solutions pour faire décroître leurs émissions, car les tonnes de carbone émises par un navire devraient donner lieu à un paiement dès 2023.

Responsabilité environnementale des entreprises

Alors que le transport maritime est régulièrement montré du doigt pour son conservatisme, son attentisme vis-à-vis des grands défis planétaires, les acteurs et les clients du transport maritime pris individuellement se voient de plus en plus encouragés par la pression sociale et par la pression financière des banques à adopter des stratégies environnementales plus offensives.

Ils peuvent pour cela se référer à au moins trois des dix-sept objectifs de développement durables (ODD) fixés en 2015 par l'ONU, ceux concernant la consommation et la production responsables, la lutte contre les changements climatiques et la vie aquatique. Ces ODD sont souvent repris comme les axes prioritaires de la responsabilité sociale des entreprises (RSE).

Cette démarche volontaire bien que de plus en plus « juridicisée » pousse à articuler éthique et efficacité entrepreneuriale dans les stratégies d'entreprises. Cela se traduit concrètement par la recherche d'une logistique responsable dans la chaîne de production. Des pratiques apparaissent, depuis des boucles d'approvisionnement plus locales jusqu'à l'information précise du consommateur, notamment via des indicateurs ou des certifications.

Indicateurs et certifications

RightShip estime les émissions de GES des navires et les classe selon leur niveau (A à G). L'organisme déclare 8000 utilisateurs de sa plateforme de consultation de données relatives aux performances environnementales et à la sécurité du transport maritime.

L'**union internationale des ports** a créé l'ESI (Environmental shipping Index) pour faire bénéficier les armateurs de réduction de droits de ports lorsque le navire est plus propre que les normes de l'OMI (réduction des émissions de polluants atmosphériques et de GES).

Green Marine (Alliance Verte) est un programme volontaire de certification environnementale pour l'industrie maritime, initialement lancé à partir du Canada pour l'Amérique du Nord. Depuis 2019, Surfrider Foundation Europe coordonne Green Marine Europe. Pour recevoir leur label, les candidats doivent mesurer annuellement leur performance environnementale à l'aide des guides d'autoévaluation, soumettre leurs résultats à une vérification externe effectuée par un vérificateur indépendant accrédité par Green Marine Europe et accepter de publier leurs résultats individuels. *Douze armateurs ont été récompensés en 2021.* Un critère portant sur les émissions de GES qui n'était pas encore développé côté canadien a été mis en œuvre pour la première fois en France pour qualifier les résultats de l'année 2020.

Initiatives d'entreprises

L'offre d'un transport maritime propulsé par le vent répond à une demande qui gagne en intensité.

A l'échelle internationale, les chargeurs deviennent de plus en plus actifs. La coalition "Cargo Owners for Zero Emission Vessels (COZEV)" rassemble neuf grandes entreprises, dont Amazon, IKEA, Michelin et Unilever. Elles se sont engagées à transférer progressivement tout leur fret maritime vers des navires propulsés par des carburants à zéro carbone d'ici 2040. Cette initiative vise à exploiter le pouvoir d'achat des plus grands propriétaires de fret au monde pour accélérer la décarbonation du secteur du transport maritime et mettre la pression sur les acteurs du maritime. De leur côté, les grands industriels se mobilisent au sein de la "First Movers Coalition" lancée dans le cadre de la COP26 pour décarboner les secteurs difficiles comme les transports maritimes.

En France, l'engagement environnemental et social d'entreprises utilisatrices de transport maritime quelle que soit leur taille, se traduit déjà en commandes pour un transport propulsé par le vent. Ainsi, Airbus, Cemoi, Bénéteau, Clarins, Michelin, Vale, Hennessy, Arcadie, Belco, Manitou, Martell Mumm Perrier-Jouët, ArianeGroup, Longchamp ont signé des contrats ou promesses de contrat en ce sens.

Certaines entreprises vont plus loin et développent une offre véritablement basée sur la propulsion par le vent.

Basée à Morlaix, la compagnie **Grain de Sail** (chocolats et cafés) utilise depuis 2020 son propre voilier cargo pour acheminer une partie de ses matières premières et prévoit d'en affréter un second en 2023 pour augmenter ses capacités de transport. Le surcoût du transport maritime propulsé par le vent au regard d'un transport conventionnel est estimé à une dizaine de centimes d'euros par tablette de chocolat. Elle valorise fortement ce mode de transport dans sa communication :

son nom est un jeu de mot transformant sel en sail, qui signifie naviguer à la voile en anglais, son logo symbolise un voilier, et son site internet relate les traversées transatlantiques du navire. Cette démarche de décarbonation s'inscrit dans une politique de développement durable plus globale.

La compagnie **TOWT** (TransOceanic Wind Transport | TOWT - Transport à la voile) affrète des voiliers pour importer et livrer ses produits en suivant plusieurs routes maritimes : liaison transmanche, cabotage régional, cabotage européen et transatlantique. Elle a créé le label ANEMOS, apposé sur les produits (denrées alimentaires de qualité, bio et/ou équitables) pour indiquer le numéro de voyage et donner accès à des informations : trace GPS, distance parcourue à la voile et journal de bord avec photos et récits.

Que peut-on attendre des carburants alternatifs ?

De nombreuses pistes sont explorées pour permettre de propulser les navires de manière décarbonée. Les possibilités sont multiples notamment en matière de carburants de synthèse comme l'hydrogène et l'ammoniac produits à partir d'électricité décarbonée ou de biocarburants produits à partir de biomasse. Aucun carburant alternatif ne semble en mesure de remplacer le pétrole avant 2030 pour des trajets au long cours du fait du manque de maturité de ces solutions, des problématiques de stockage, de chaîne d'approvisionnement et de logistique. En revanche, ces solutions sont toutes complémentaires avec la propulsion par le vent.

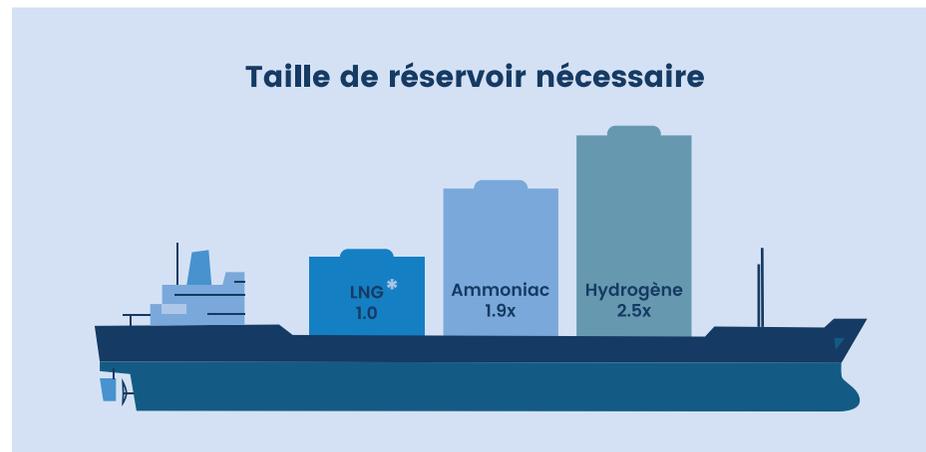
Par ailleurs, la plus grande difficulté tient au coût de ces nouvelles

sources d'énergie, qui multiplierait d'un facteur 2 à 8 les dépenses liées au carburant (source :¹⁴).

Faible efficacité énergétique et risques sécuritaires élevés

Le constat est implacable : il n'existe pas de source d'énergie présentant la même densité énergétique que le pétrole (le nucléaire mis à part). Les biocarburants s'en rapprochent mais posent d'autres problèmes évoqués par la suite.

Pour un équivalent d'énergie, on aura besoin de volumes beaucoup plus importants de carburants alternatifs. Ceux-ci devront donc généralement être comprimés (ou liquéfiés), ce qui pose des enjeux techniques et sécuritaires. Cet enjeu de densité énergétique élimine par exemple l'utilisation de batteries pour des navigations au long cours et pousse à privilégier l'ammoniac devant l'hydrogène et le méthanol.



Stockage du carburant alternatif par rapport à un carburant fossile

*LNG : gaz naturel liquéfié. Source : [SeaLNG](#)

Quel que soit le carburant envisagé, des impacts et des contraintes fortes existent.

Outre les aspects techniques de compression ou liquéfaction des carburants alternatifs, leur dangerosité est fréquemment évoquée. La petite taille d'une molécule d'hydrogène augmente le risque de fuite de celle-ci, et sa facilité à s'enflammer et à exploser doit générer des mesures importantes de sécurité.

La toxicité de l'ammoniac constitue elle aussi un véritable défi, étant mortel à très faible concentration dans l'air. Par ailleurs, sa combustion génère la production d'oxydes d'azote (NOx) qu'il faudra traiter pour respecter les règles de l'OMI en la matière.

La R&D progresse et permettra sans doute de réduire certaines difficultés par de nouvelles propositions technologiques, mais attendre la maturité de celles-ci ne permet pas de régler la question climatique immédiate.

Non disponibilité et concurrence avec d'autres besoins

Il n'est pas possible de produire aujourd'hui les carburants alternatifs de manière décarbonée et en quantité suffisante pour le secteur maritime. Il faut l'appui d'usages terrestres pour engager les dépenses massives nécessaires, ce qui génère aussi une compétition pour l'utilisation des produits finaux.

Par exemple, la stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné en France publiée en 2020 fait état d'un objectif de 6,5 GW d'électrolyseurs installés d'ici 2030, en priorité pour décarboner l'industrie (raffinage, chimie notamment) puis les véhicules terrestres et le ferroviaire uniquement. Autre exemple, la capacité de production de

biocarburant de l'Union européenne ne serait que de 1,7 million de tonnes en 2030, nécessitant l'importation de 5,1 millions de tonnes (source :¹⁵) pour satisfaire d'autres usages que le transport maritime (c'est notamment l'un des seuls carburants que l'aviation pourrait utiliser).

Coût élevé de la production, du transport et du stockage à terre

Pour diminuer de 50% les émissions de GES d'ici 2050, ce sont 800 à 1200 milliards de dollars qui doivent être investis entre 2030 et 2050, soit 40 à 60 milliards par an pendant 20 ans (source :¹⁶), d'après l'étude publiée par l'University Maritime Advisory Services (UMAS) en janvier 2020. Si l'on envisage une décarbonation totale du transport maritime, il faut encore y ajouter 400 milliards, soit un total de 1200 à 1600 milliards de dollars.

Cette estimation s'est appuyée sur l'hypothèse que l'ammoniac serait un carburant alternatif largement adopté par l'industrie maritime – mais le choix d'un autre carburant comme l'hydrogène (détail :¹⁷) ou le méthanol de synthèse ne changerait pas fondamentalement l'échelle des investissements.

Ces montants sont liés pour 87% à des investissements à terre, afin de produire l'hydrogène, synthétiser l'ammoniac, transporter et stocker les produits de synthèse, puis mettre en place les infrastructures de soutage. Seuls 13% de ces montants seront des investissements sur les navires (stockage à bord, motorisation).

Une analyse de la Lloyd's List (source :¹⁸) estime que la construction d'une usine permettant de produire suffisamment d'ammoniac de manière décarbonée pour alimenter 4 navires post-panamax (capacité > 6400 EVP) nécessiterait aujourd'hui un investissement de 690 à 791 millions de dollars.

Le coût de production du carburant actuel désoufré (LSFO) est estimé à de 0,039 USD/kWh et le coût de production de l'ammoniac à partir d'électricité décarbonée est de 0,21 USD/kWh (source :¹⁹).

Manque de financement de la R&D

Des propositions ont été déjà avancées pour financer la R&D nécessaire au développement des navires, à grand renfort de taxe sur le carburant, sur les émissions de CO2, ou de mesures basées sur le marché carbone. Les armateurs regroupés au sein de l'International Chamber of Shipping ont suggéré de mettre en place une taxe de 2\$ par tonne de carburant, ce qui pourrait générer un fond de 5 Mds \$ dédié à la R&D dans le cadre d'un International Maritime Research and Development Board (IMRB) pour une période de 10 ans, afin d'accélérer le développement de navires zéro émission qu'ils estimeraient commercialement viables dans les années 2030.

En septembre 2020, Trafigura, un des plus importants chargeurs au monde (plus de 4000 expéditions maritimes par an), a proposé la mise en place d'une taxe de 250 à 300 \$ par tonne de CO2 équivalent, afin de financer la R&D et de soutenir les pays en développement impactés par le changement climatique soit 500 millions \$ par an.

En mars 2021, deux pays insulaires du Pacifique, les îles Marshall et les îles Salomon ont proposé à l'OMI d'imposer une taxe de 100 \$ par tonne de CO2 équivalent.

Enfin, l'Union Européenne propose l'entrée du transport maritime dans son marché carbone, au sein duquel la tonne de CO2 est aux environ de 50 € actuellement - une partie des recettes générées (3%) pourrait alimenter un fonds de R&D permettant de développer des technologies de décarbonation.

Synthèse des impacts										
	Sécurité		Contraintes opérationnelles				Environnement		Sociaux	
	Feux / explosions	Toxicité	Pression	Corrosion	Cryogénisation	Place sur pont	Stockage soute	Infrastructure terrestre	GES / polluants	Compétition avec usages terrestres
GNL	●		●		●		●	●	●	
Ammoniac	●	●					●	●	●	●
Hydrogène liquide	●		●	●			●	●		●
Méthanol	●	●					●	●		●
Biocarburant								●	●	●
E-carburant	○	○	○				●	●		●
Vent						●				

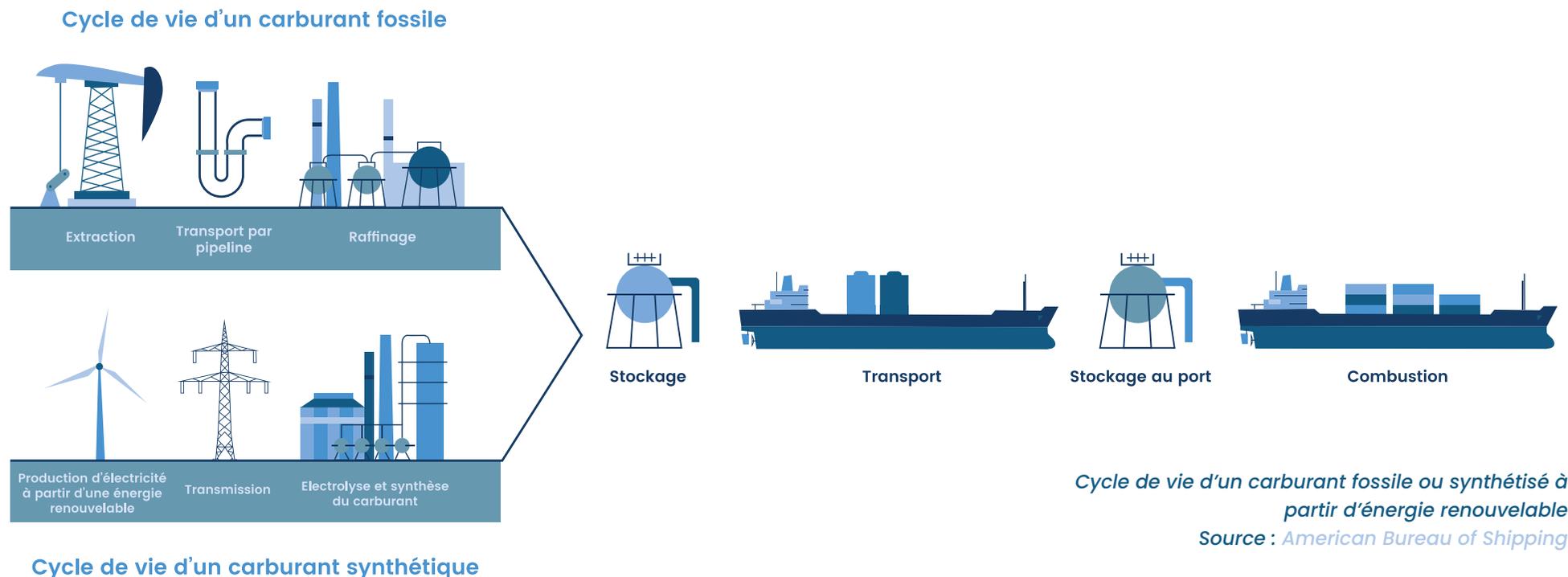
Impacts de différentes sources d'énergie pour propulser les navires

Bilan carbone lourd sur le cycle de vie complet

Enfin, l'un des enjeux majeurs aujourd'hui pour le développement des carburants alternatifs, est de ne pas mettre sur le marché un carburant alternatif qui, certes, permet de diminuer les émissions de polluants et de GES pendant la phase de transport maritime, mais qui, pour être produit en amont, a émis de grandes quantités de GES. C'est la comparaison sur le cycle de vie complet de ce dernier qui doit être prise en compte. On parle ainsi de facteur d'émissions du puit au réservoir (well to tank) c'est-à-dire les émissions émises pour produire le carburant (extraction, transformation, transport, stockage) puis des émissions du réservoir à

l'hélice (tank to wake), soit les émissions pour la phase d'utilisation du carburant pendant le transport. L'addition de ces 2 valeurs va donner le facteur d'émission globale du transport, en fonction de la motorisation mise en œuvre sur le navire.

Les schémas ci-dessous illustrent ces cycles pour un carburant gris actuel (hydrocarbure), et pour un carburant vert produit à partir d'énergie renouvelable : ces cycles, nécessaires, occasionnent une déperdition forte d'énergie finalement utilisable, et illustrent par ailleurs toutes les étapes préalables nécessitant énergie et infrastructures avant la combustion finale dans le moteur du navire.



Des comparaisons en matière d'émission ont été publiées par la société de classification American Bureau of Shipping, qui examine les émissions de différents carburants alternatifs selon les phases considérées : du puits au réservoir puis du réservoir à l'hélice. Cette comparaison considère les sources d'approvisionnement actuellement disponibles et montre le risque de déplacer les émissions de la phase de transport à la phase de production amont des carburants alternatifs (annexe).

La première mesure à mettre en œuvre pour une transition écologique rapide du transport maritime tient avant tout à la diminution effective du besoin énergétique des navires pour n'avoir à assurer qu'une part résiduelle de ce besoin énergétique à l'aide des carburants alternatifs. C'est justement ce que permet la propulsion par le vent, qui amène ainsi une partie significative de la solution.



02 Les modes de propulsion par le vent au XXI^e siècle

Quelques repères sur la navigation à la voile

Pratiquée depuis l'Antiquité, la navigation à voile a constitué le vecteur sans doute le plus marquant du développement de la France, lui assurant aux XIV^e et XV^e siècles une capacité commerciale et militaire unique, et ayant impulsé l'apparition d'un État moderne. La flotte de commerce maritime internationale à voile ne cesse de s'accroître jusque dans les années 1880, avec des clippers – navires longs, étroits et rapides, dépassant les 100 m et atteignant jusqu'à 21 nœuds, grâce une excellente connaissance des régimes de vent et de courant sur toutes les mers du globe.

En parallèle, la propulsion des navires par un moteur thermique apparaît au XIX^e siècle. Les moteurs à vapeur sont alimentés au charbon dans un premier temps, avant l'invention du moteur à combustion interne de Diesel. Avant 1850, seules les liaisons passagers rapides et sur de courte distance utilisent la vapeur, tandis que les échanges commerciaux se font toujours à la voile. De grandes quantités de charbon sont nécessaires, ce qui occupe une grande part du volume de soute, et les risques d'incendie ne sont pas négligeables.

Mais l'apparition des turbines va favoriser la vapeur : elles réduisent la consommation de charbon, libérant les soutes et améliorant les

conditions de navigation (vibrations et bruit). Ainsi, le tonnage transporté par les navires à vapeur dépasse celui des voiliers en 1880. En parallèle, la défaite de la marine française lors du bombardement de Sébastopol pendant la Guerre de Crimée démontre l'inadaptation des voiliers en bois face aux batteries flottantes cuirassées.

Enfin, trois facteurs se cumulent pour amener à la disparition des navires à voiles. D'une part, l'ouverture du canal de Suez en 1870 diminue l'avantage des clippers sur les trajets longue distance – d'autant que l'accès au canal (mer Rouge) est défavorable aux voiliers par manque de vent. D'autre part, l'augmentation de la capacité des navires nécessite plus de marins à bord pour gérer de plus grandes surfaces de voiles, donc un coût plus important alors même que les équipages sont difficiles à recruter. Enfin, après des destructions importantes lors de la Première Guerre Mondiale, la crise de 1929 achève la disparition des grands voiliers dont il ne reste aujourd'hui que 70 unités dans le monde.

Le passage au diesel de la flotte de pêche se fait pour sa part plutôt après la Seconde Guerre Mondiale, lors des plans Monnet (1947 et 1955). Ne reste alors quasiment que la flotte de plaisance apparue à la fin du XIX^e siècle, une pratique qui se développe jusqu'à représenter aujourd'hui une véritable industrie nautique, dont certains développements sont à la source d'innovations technologiques qui inspirent les navires propulsés par le vent du XXI^e siècle.

Un foisonnement d'innovations technologiques

Des solutions très diverses sont aujourd'hui étudiées et prototypées pour permettre à la navigation de renouer avec la propulsion par le vent, dans des conditions de performance compatibles avec les contraintes actuelles du transport maritime. Certaines de ces innovations remontent aux années 1920.

Des origines multiples

L'effet Magnus et la goélette d'Anton Flettner

L'une des premières solutions modernes développées est celle du rotor, qui utilise l'effet Magnus : la mise en rotation d'un cylindre de métal sur le pont du navire génère une portance. Cette solution a été utilisée dès 1924 par Anton Flettner sur la goélette allemande Buckau qui, convertie grâce à 2 rotors de 15 m, a traversé l'Atlantique. Un autre navire a été utilisé de 1926 à 1929 en Méditerranée. Ces premières expériences n'ont pas été poursuivies, car le prix très bas du pétrole ne justifiait pas alors d'investir dans les énergies renouvelables. Elles ont été reprises bien après, notamment via le navire E-Ship 1 de la société ENERCON, qui navigue depuis 2010.

La turbovoile de l'équipe du Commandant Cousteau

Dans les années 1980, l'équipe du commandant Cousteau, avec le professeur Malavard et le docteur Charrier, a conçu un profil aspiré dit « turbovoile » et l'a installé sur le bateau « Moulin à Vent ». La turbovoile optimise l'écoulement de l'air par un système d'aspiration le long du profil pour créer une poussée aérodynamique. Le Moulin à Vent a réalisé

de premières traversées entre Tanger et New-York, entre 1981 et 1983. La société Péchiney en a acheté le brevet pour développer le système mais la fin du second choc pétrolier et la baisse des cours du pétrole au milieu des années 80 ont eu là-aussi raison de l'expérience. L'Alcyone a été exploitée avec la turbovoile pendant une dizaine d'années et navigue toujours. Le CRAIN (La Rochelle) a relancé la R&D autour de ce principe de profil aspiré en 2015.

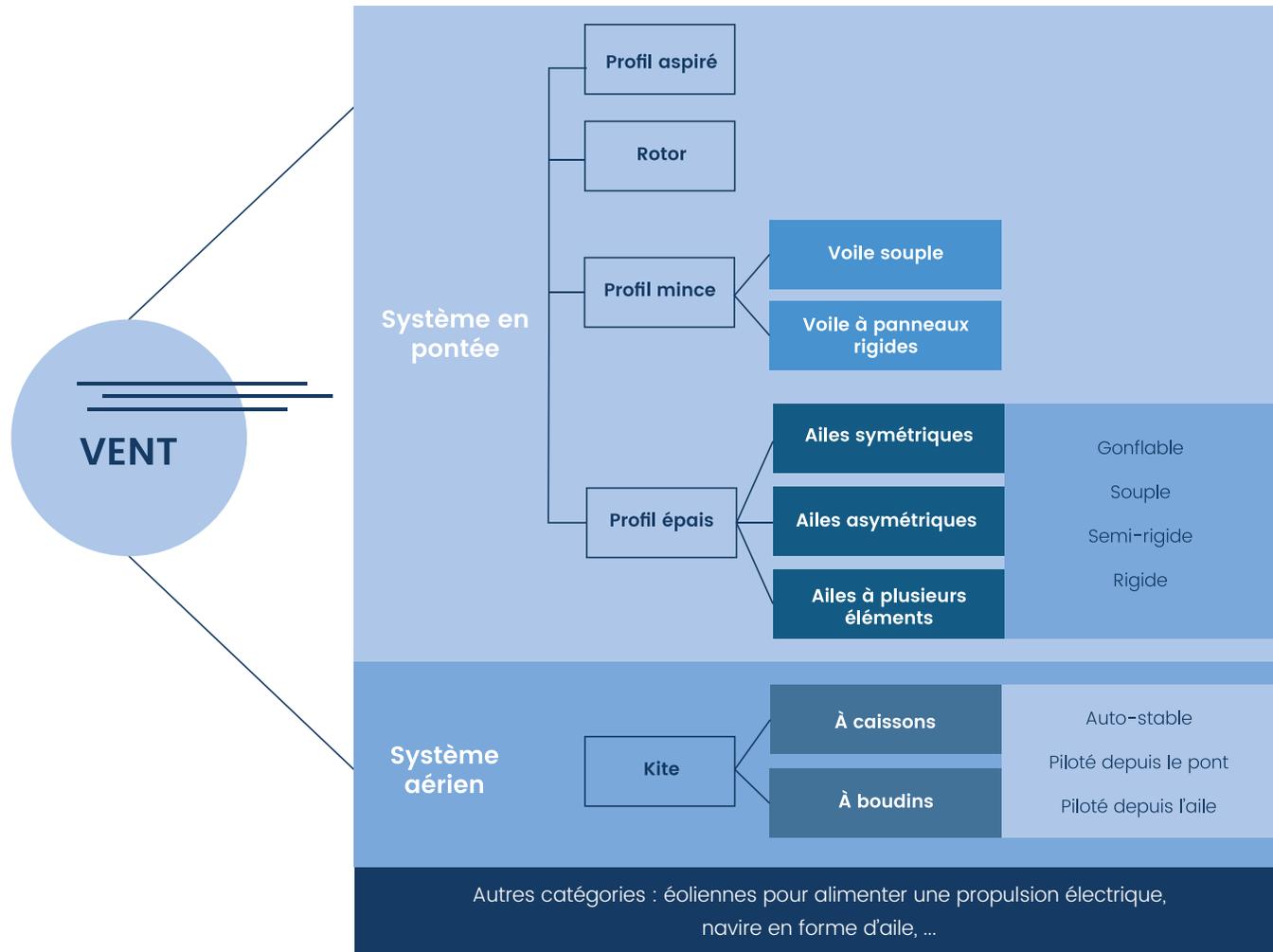
La course au large et l'aéronautique

La voile de compétition et la course au large nourrissent également l'innovation. Ainsi, c'est l'aile rigide articulée dessinée par le cabinet d'architectes VPLP qui a permis la victoire du trimaran USA 17 (BMW Oracle Racing) lors de l'America's Cup de 2010. Ce concept a inspiré le développement des profils épais par le même cabinet d'architecture navale pour équiper des navires de commerce. Cela a abouti à la création en 2018 de la société AYRO dédiée à la conception et à la fabrication de ces ailes.

Si le nautisme a fait naître ces ailes volantes appelées kites, l'aéronautique a quant à elle joué un grand rôle dans leur adaptation à la marine marchande, grâce à sa maîtrise des conditions de vol et de la sécurité.

Éléments de classification

On distingue cinq principales familles de technologies.



Classification des technologies de propulsion par le vent

Quatre d'entre elles équipent le navire en pontée, c'est-à-dire sur le pont, le kite faisant exception. Le kite a l'avantage de ne pas encombrer le pont, et d'aller chercher plus haut des vents plus forts et plus stables. Il fonctionne de manière optimale aux allures portantes.

Le rotor et le profil aspiré, déjà évoqués, sont des systèmes très compacts, mais ils ont besoin d'une énergie extérieure pour entrer en rotation, tourner ou aspirer l'air. Leurs performances optimales sont obtenues pour des plages de vent apparent généralement plus réduites que les autres systèmes.

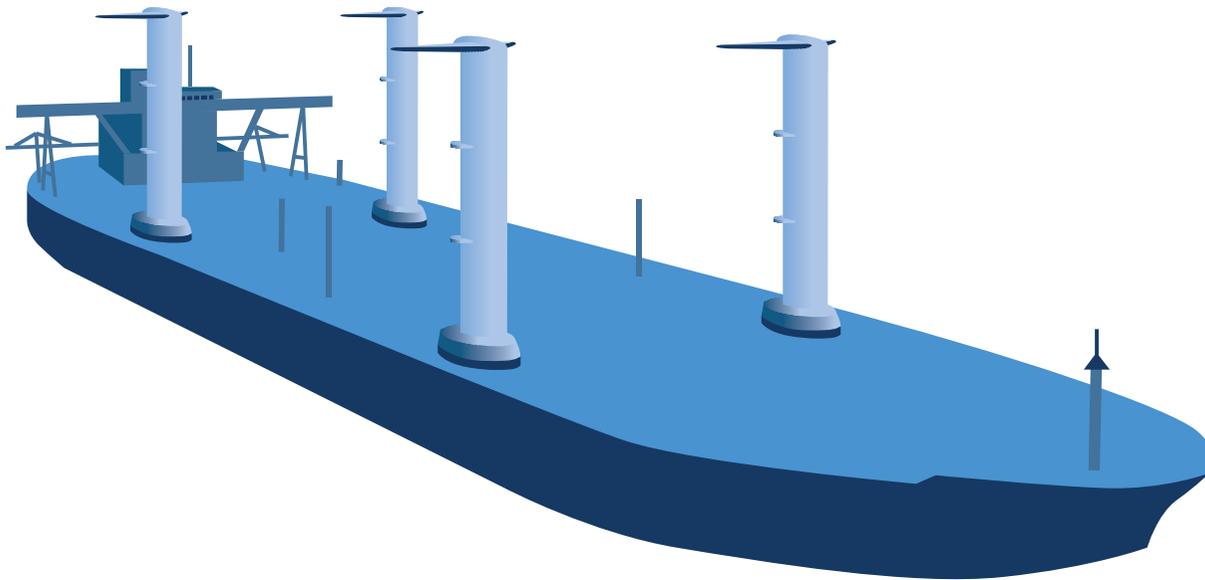
Les autres technologies en pontée s'apparentent soit à des voiles soit à des ailes, au profil plus épais (vu en coupe longitudinale). Leurs propriétés aérodynamiques varient en fonction de l'épaisseur mais aussi de la cambrure ou de la symétrie de la voile ou de l'aile. Les profils épais présentent une bonne "finesse aérodynamique" c'est-à-dire un rendement performant lorsqu'il s'agit de remonter au vent.

Les ailes et voiles se différencient aussi par leur matériau et leur rigidité. Un matériau textile souple est plus facile à affaler ou arriser (réduction de la voilure) mais s'use plus rapidement par exposition aux rayons ultra-violets et par fageyement (voile battue par le vent). Certaines ailes en membrane textile sont rendues plus robustes grâce à un gonflage qui les rigidifie. Les systèmes rigides misent sur la robustesse et leur capacité à orienter les ailes de manière optimale par rapport au vent.

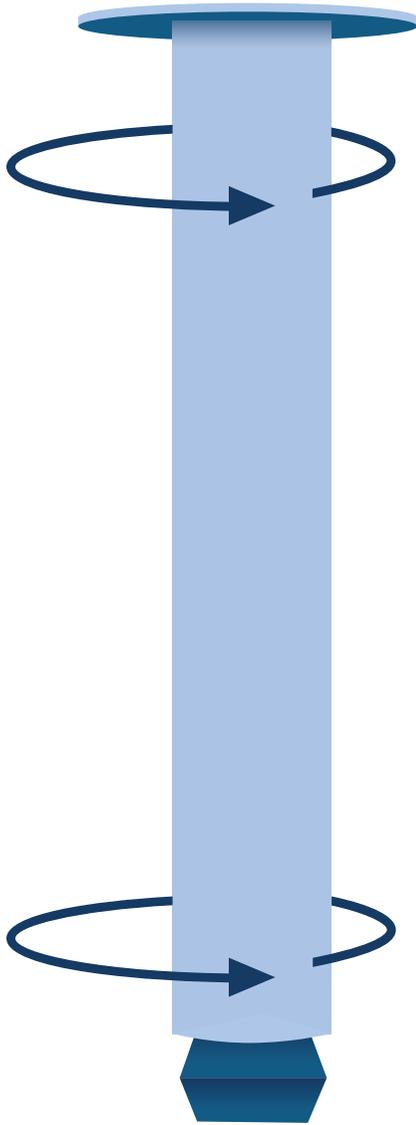
D'autres caractéristiques peuvent compléter cette catégorisation, telles que le nombre d'éléments dans les ailes articulées, le type d'articulation (fente, volet) etc.

Profil aspiré

Le profil aspiré est constitué d'une aile métallique cylindrique verticale, équipée d'une grille d'aspiration et d'un volet qui optimisent la portance du système.



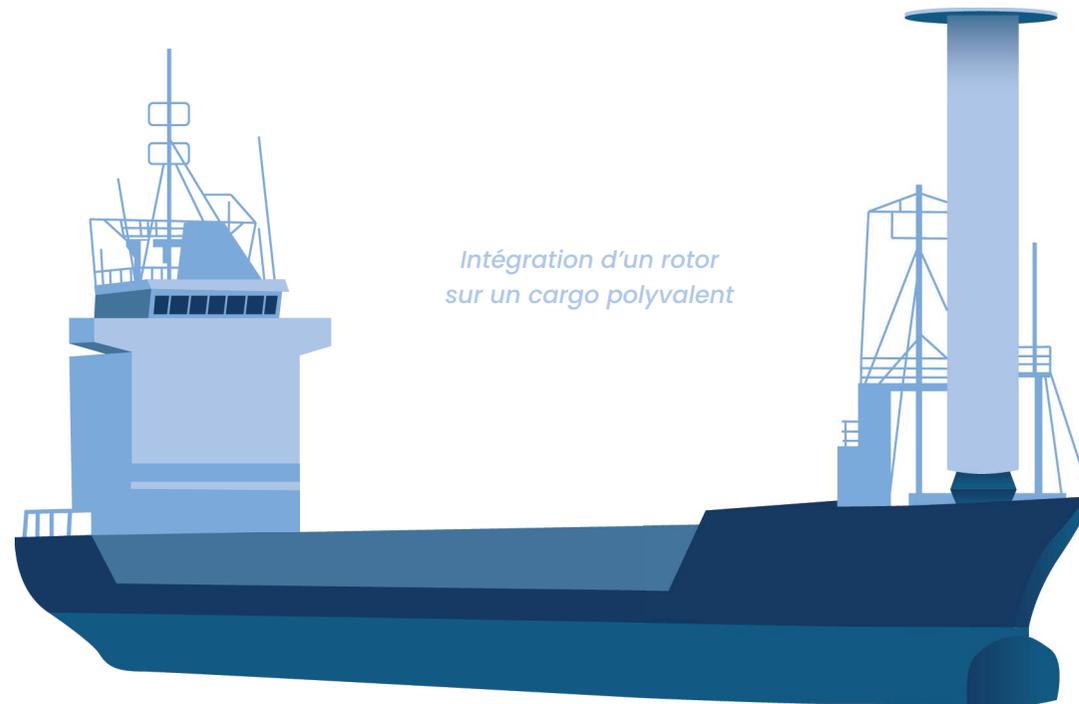
Intégration des profils aspirés sur un pétrolier



Rotor

Le rotor est un cylindre métallique mis en rotation par une motorisation. Cette rotation permet au cylindre de générer une poussée par effet Magnus.

Les rotors peuvent être équipés d'un système de bascule pour diminuer leur tirant d'air.



*Intégration d'un rotor
sur un cargo polyvalent*

Profils minces

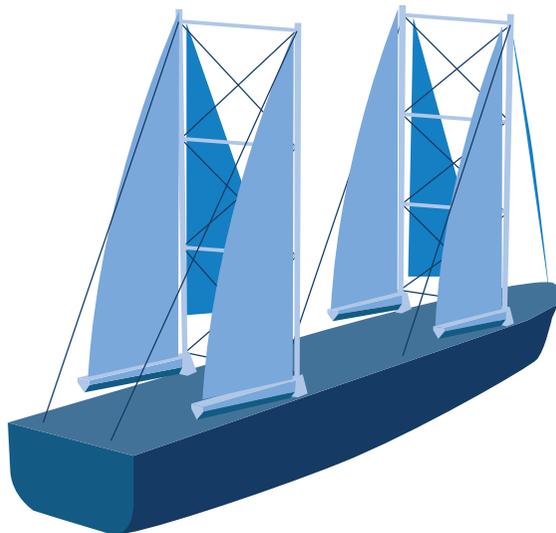
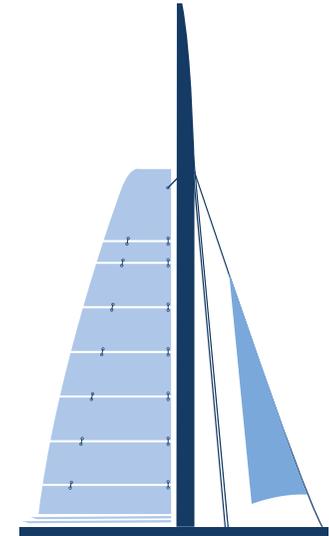
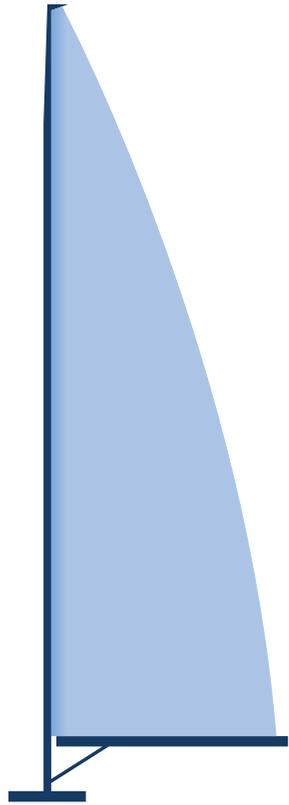
Les voiles souples textiles

peuvent être gréées de différentes manières. Elles sont affalables et arrisables. Dans certains cas, les mâts peuvent être rabattus pour permettre un passage sous les ponts.

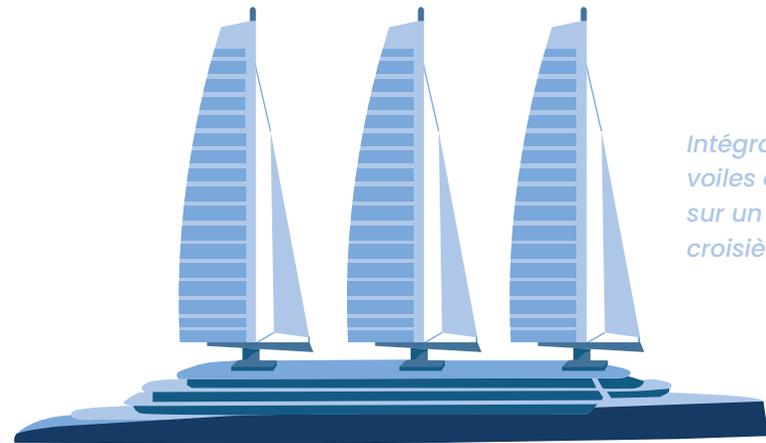
La voile peut être constituée de panneaux mobiles en fibre de verre.

Elle se déforme sous la pression aérodynamique sans faser.

Elle peut être montée sur un gréement à balestron qui s'oriente indépendamment de l'angle au vent du navire pour maîtriser les efforts en fonction du vent.



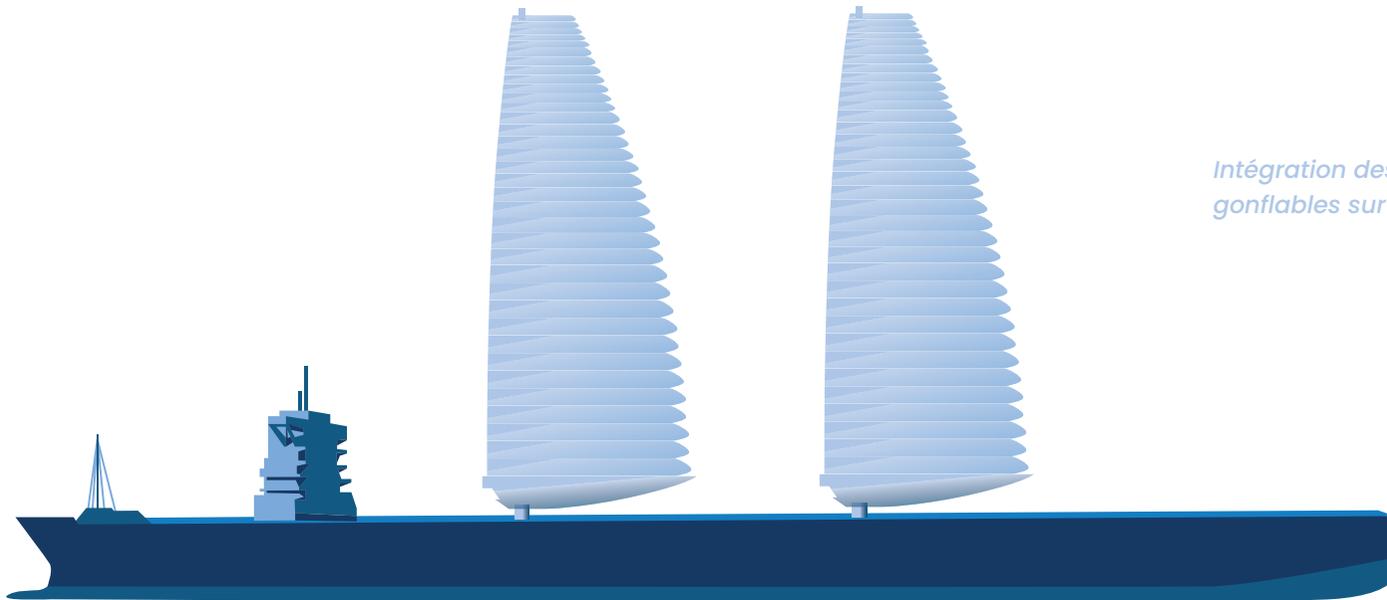
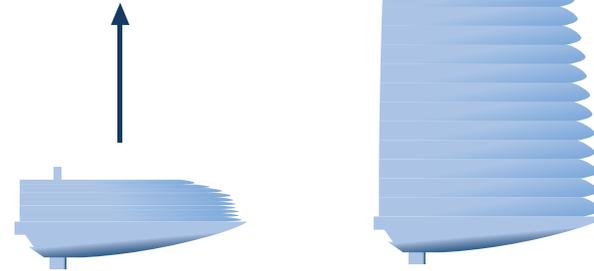
Intégration des voiles sur un roulier



Intégration des voiles à panneaux sur un navire de croisière

Profil épais

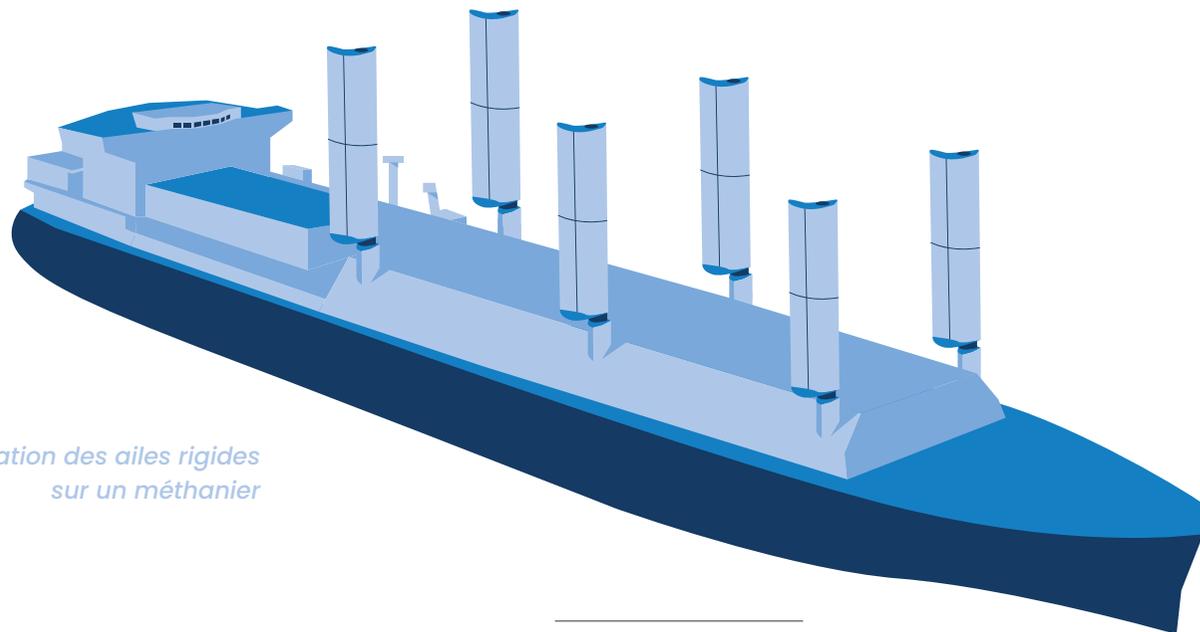
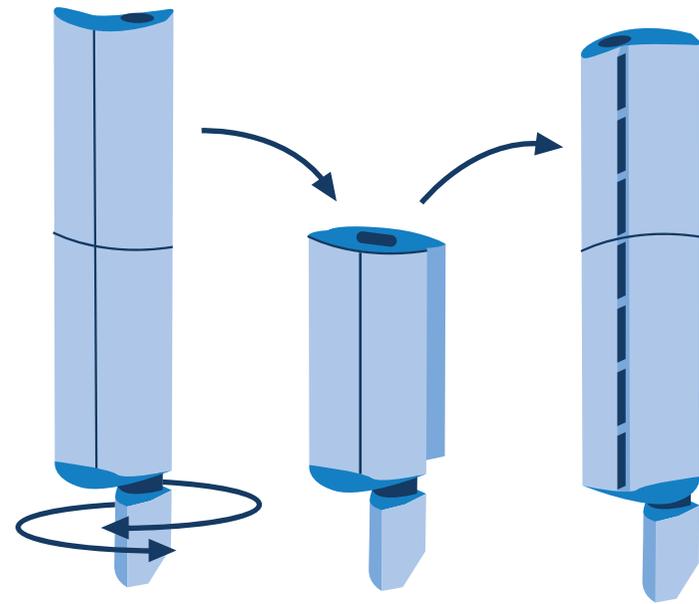
Les ailes symétriques gonflables sont en textile, gonflées et équipées d'un mât télescopique, pouvant se rétracter.



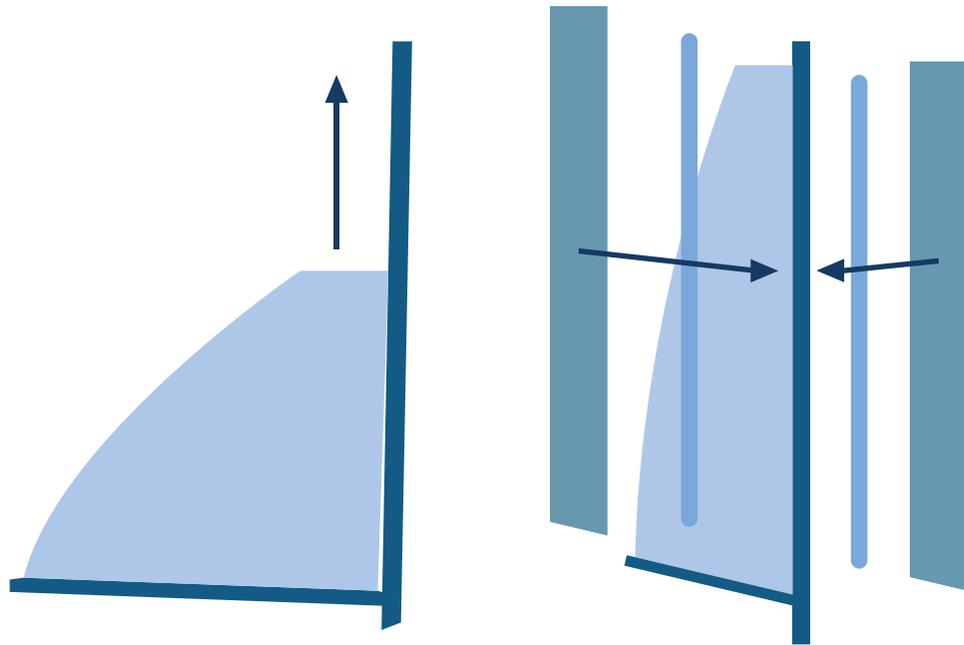
Intégration des voiles gonflables sur un vraquier

Profil épais

Les ailes rigides asymétriques sont en matériaux composites comme une pale d'éolienne. Elles peuvent se déplier dans un sens ou dans l'autre pour s'inverser et s'orienter de façon optimale



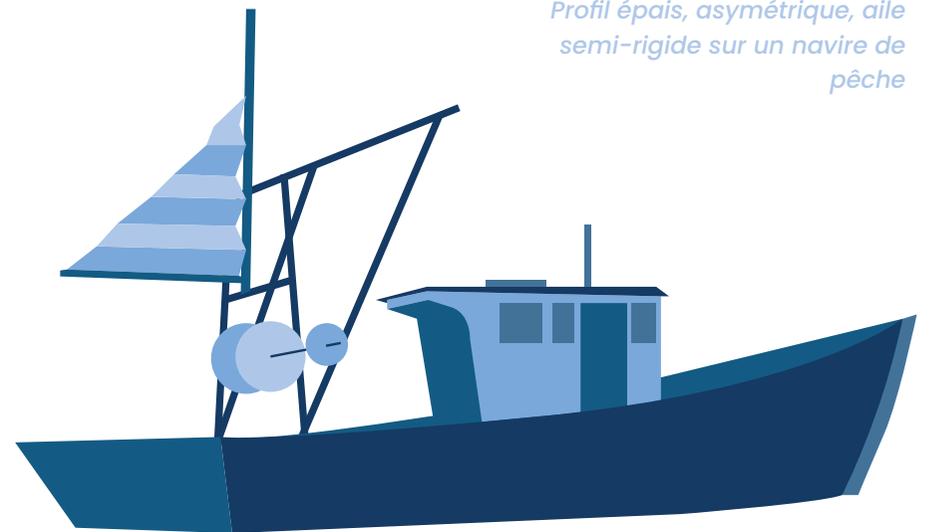
*Intégration des ailes rigides
sur un méthanier*



Profil épais, asymétrique, aile semi-rigide sur un navire de pêche

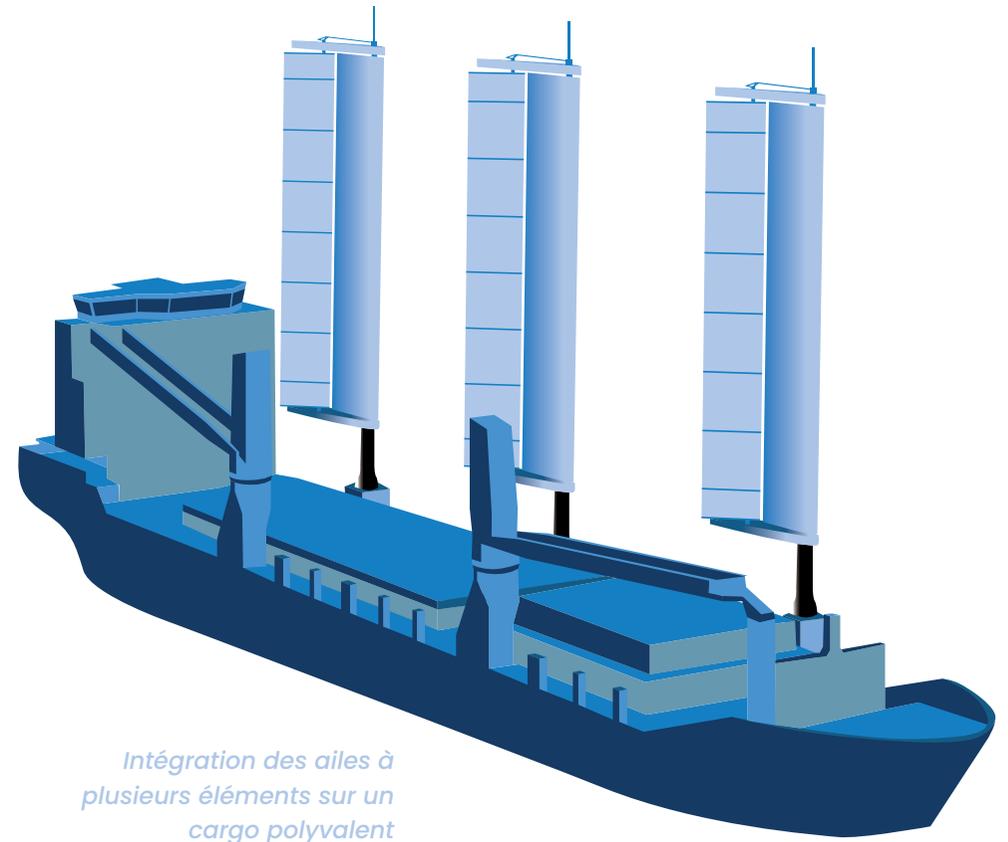
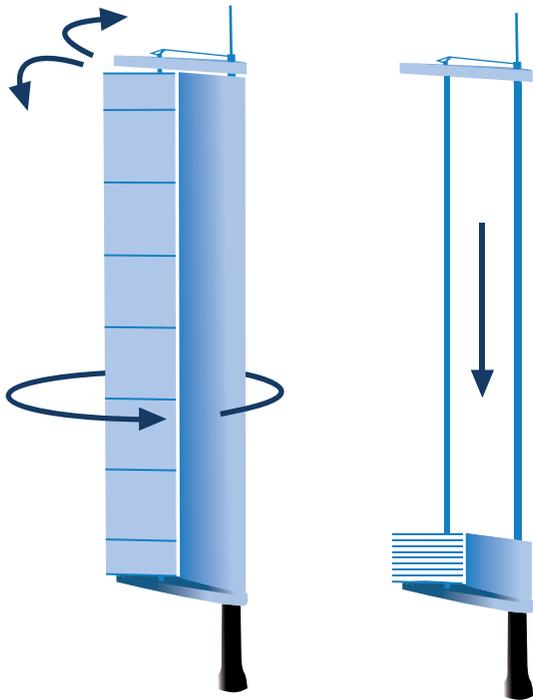
Profil épais

Les ailes asymétriques semi-rigide sont composées d'une voile classique équipée de plaques flexibles et d'un système de gonflage pour éviter le fasyement.

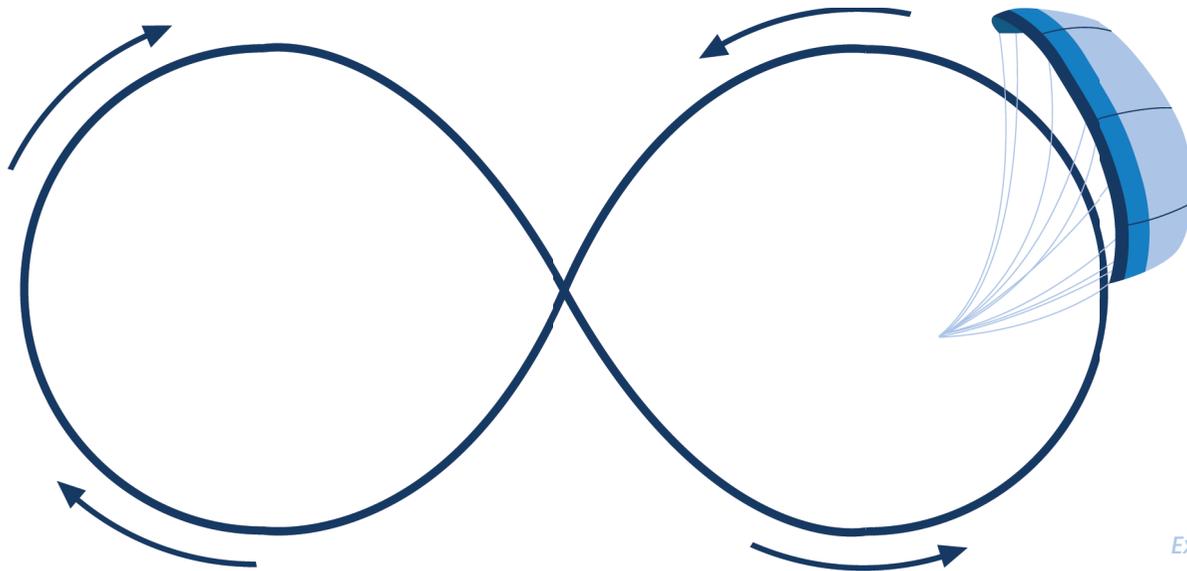


Profil épais

Les ailes à plusieurs éléments sont dotées d'une structure semi-rigide en composite, et d'une enveloppe textile. L'ensemble est affalable et arrisable.



Intégration des ailes à plusieurs éléments sur un cargo polyvalent

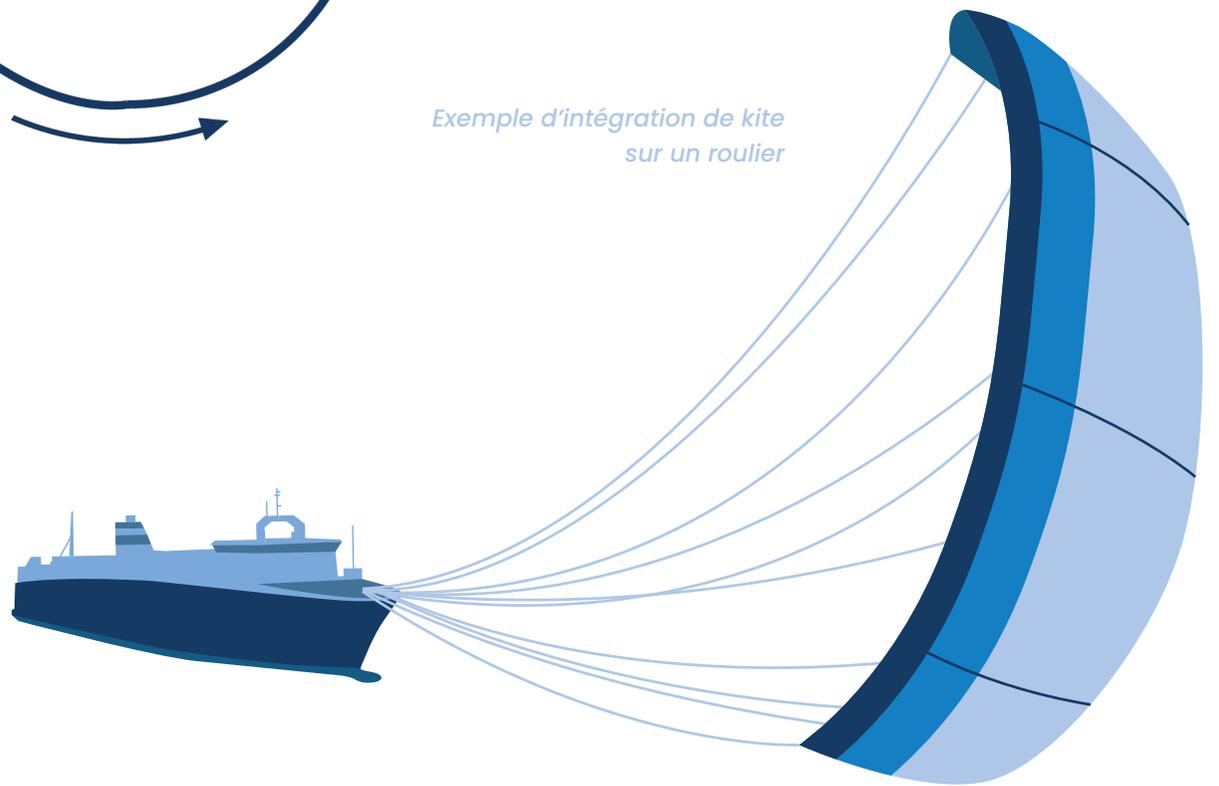


Exemple d'intégration de kite sur un roulier

Kite

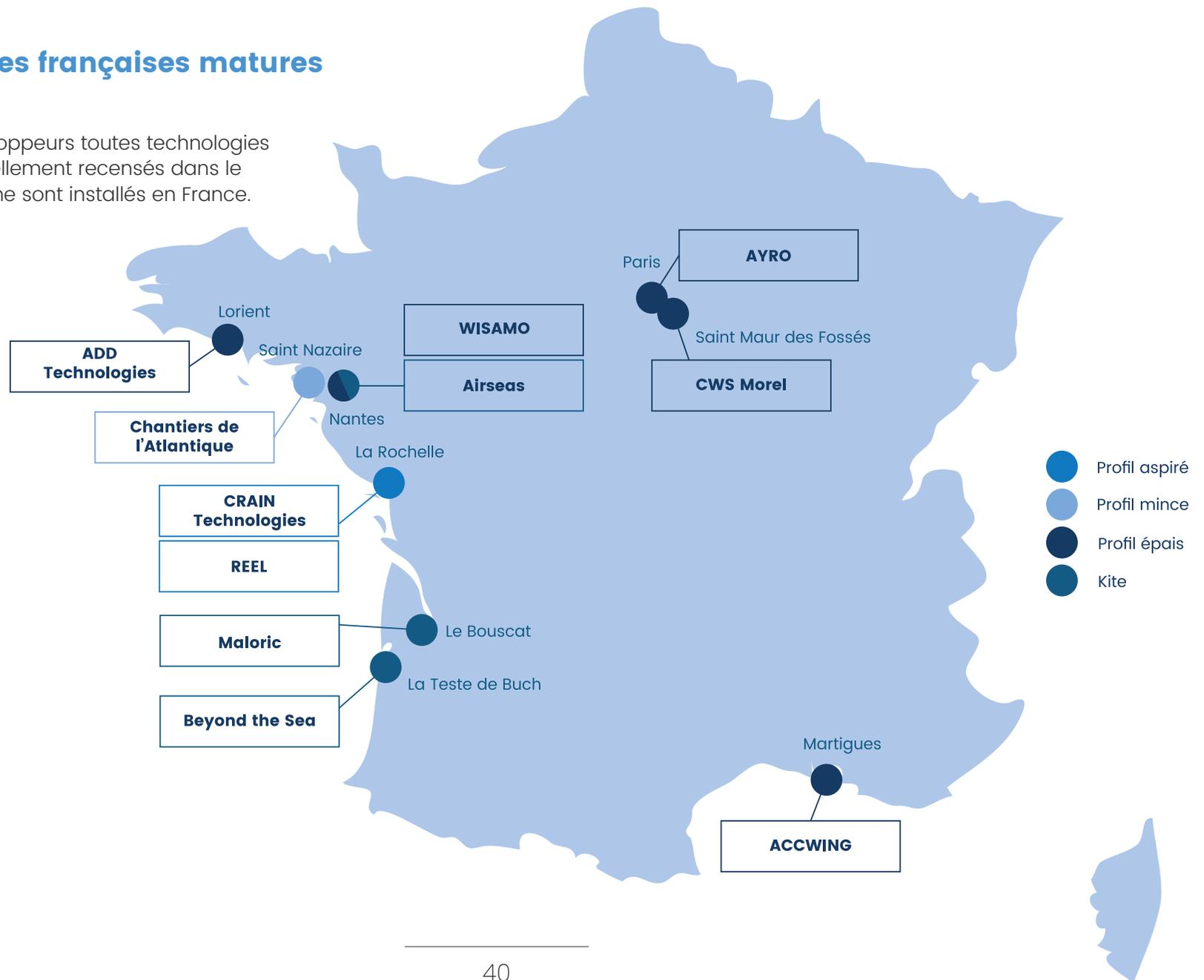
Le kite est une aile qui assure sa sustentation et la traction du navire par l'intermédiaire d'une ou plusieurs lignes.

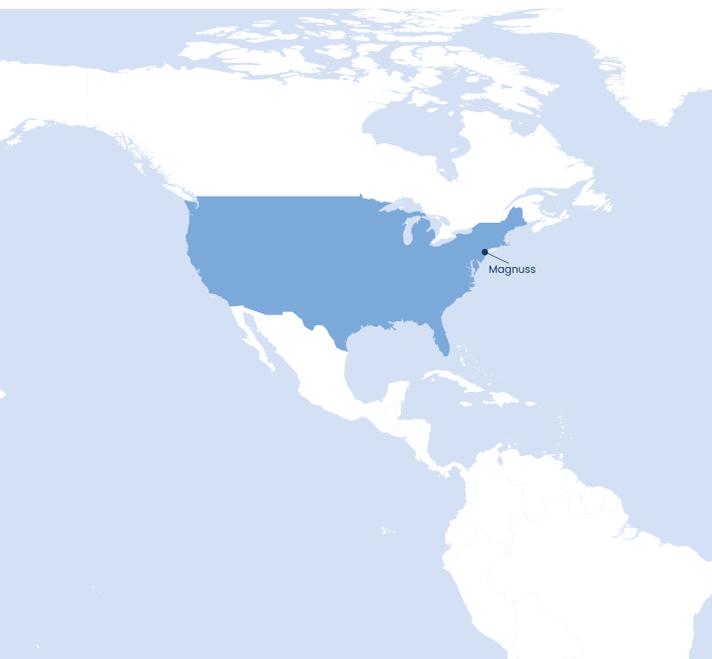
Le kite fonctionne au près en vol statique (à la même vitesse que le navire) et au portant en vol dynamique ou il décrit des huit qui augmentent son vent apparent et donc son rendement par unité de surface.



Des technologies françaises matures

Une trentaine de développeurs toutes technologies confondues sont actuellement recensés dans le monde, dont une dizaine sont installés en France.





Le niveau de maturité des différentes technologies développées en France est en majorité élevé, de l'ordre de 6 à 8 c'est-à-dire entre l'étape de la démonstration des prototypes dans un environnement représentatif, voire opérationnel jusqu'à la préindustrialisation.

Plusieurs démonstrateurs à terre sont en test. C'est le cas du profil aspiré du CRAIN et du kite d'Airseas à la Rochelle ainsi que des voiles à panneaux des Chantiers de l'Atlantique à Saint Nazaire. Les tests ne concernent pas tous des modèles à l'échelle 1, mais Airseas a installé son prototype de 500 m² sur le roulier Ville de Bordeaux en décembre 2021, tandis que les Chantiers de l'Atlantique doublaient la taille du gréement pour atteindre plus de 80 mètres et 1200 m² de voiles (échelle 1) début 2022.

D'autres sont testées en navigation, telles les ailes Oceanwings® d'AYRO sur le navire Energy Observer ; elles doivent équiper le navire Canopée actuellement en cours de construction. Un démonstrateur de l'aile d'ADD Technologies est installé sur un navire de pêche et un autre vient d'achever une traversée de l'Atlantique sur la Mini-Transat 2021. L'aile gonflable de WISAMO navigue sur le bateau de Michel Desjoyaux tandis que les Chantiers de l'Atlantique ont testé leur voile à panneaux sur le 60 pieds de Jean Le Cam puis pendant un an sur le navire de croisière Le Ponant de la Compagnie éponyme.

Enfin, AYRO et Airseas ont lancé la construction de leurs usines de production à Caen et dans la région nantaise.

La plupart des segments du transport maritime concernés

Les différentes technologies actuelles de propulsion par le vent sont adaptées au besoin de la plupart des segments du transport maritime. Certaines apportent une propulsion avec des angles de vent fermés, pouvant travailler avec une vitesse relativement élevée recherchée par les porte-conteneurs, d'autres vont fonctionner avec les vents forts et stables des mers d'Europe du Nord, d'autres enfin séduiront par leur polyvalence.

Ces technologies équipent déjà des navires de différentes tailles et types.

Plus de dix grands navires (jauge supérieure à 5000) ont été équipés de rotors : vraquier, pétrolier, cargo, roulier, ferry, principalement en mer du Nord, Baltique, mais aussi en transpacifique, dans les Caraïbes et sur la route Europe-Asie. Cinq navires existants ont été équipés de profils aspirés : cargos, navires à passagers ainsi qu'un navire de pêche, naviguant en mer du Nord, Baltique et Manche, Atlantique, dans les Baléares et le Pacifique.

De nouvelles installations sont prévues qui élargiront encore l'éventail des applications : transport de véhicules, navire de croisière, mais aussi des navires de petite taille pour des dessertes secondaires le long des côtes métropolitaines ou outre-mer. Enfin, des concepts ont été dessinés pour le transport conteneurisé. Les porte-conteneurs existants présentent un pont particulièrement occupé, laissant peu de possibilité pour une propulsion par le vent en pontée mais les kites pourraient être adaptés. En revanche, de nouveaux concepts de porte-conteneurs intégrant des dispositifs en pontée ont reçu une approbation de principe par une société de classification (détail : ²⁰).

Le vent, une extraordinaire source d'énergie pour le transport maritime

Le vent est une source d'énergie sûre, disponible et le routage en optimise l'exploitation et fiabilise le transport.

Énergie gratuite

L'énergie du vent est utilisée directement sur place sans concurrencer un autre besoin en énergie, notamment à terre.

L'énergie du vent est gratuite quand les niveaux d'investissement financiers liés à la production de nouveaux carburants sont extrêmement élevés. Elle est présente directement en mer et ne nécessite aucune transformation, aucun transport, aucun stockage à terre. Elle ne nécessite aucun soutage. Elle permet même la production d'énergie pour d'autres usages à bord que la propulsion grâce à des hydro-générateurs par exemple.

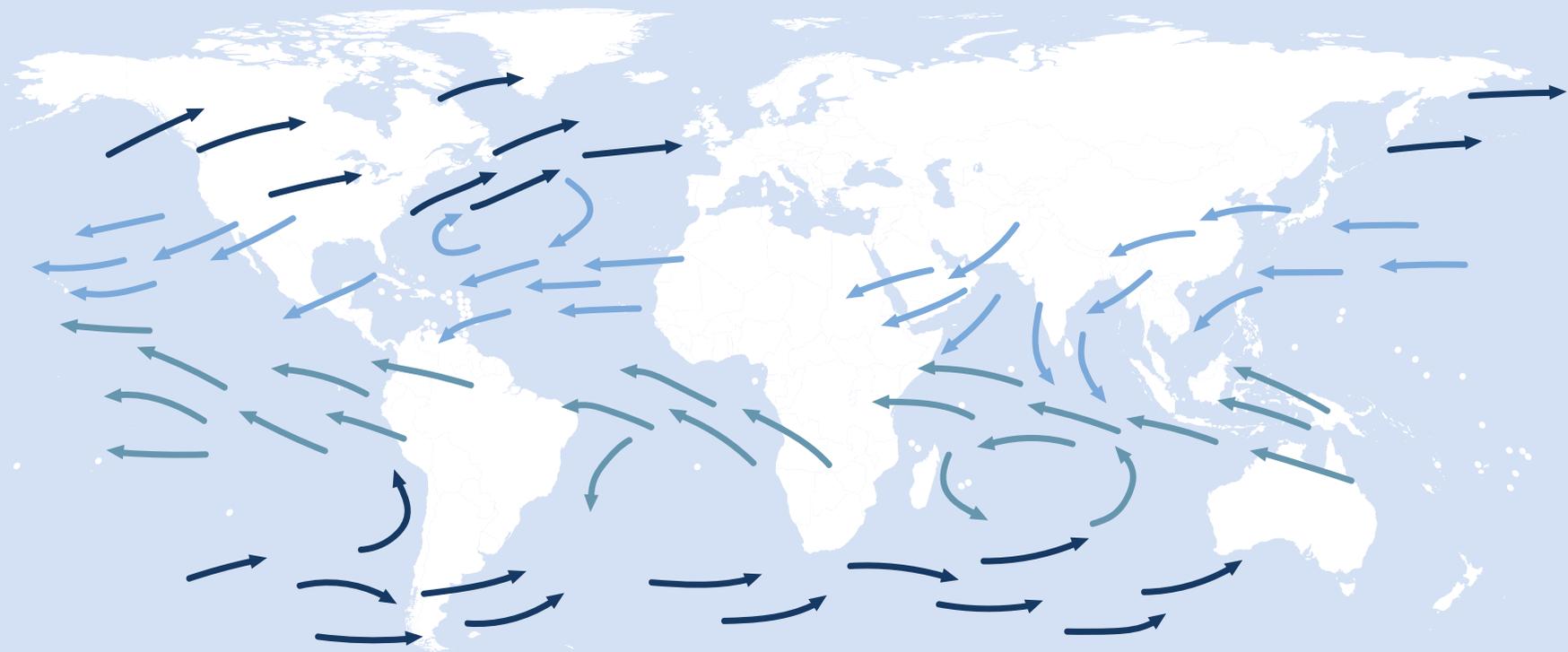
Disponibilité en abondance

L'énergie du vent est disponible sur toute la planète et les principales routes maritimes, y compris dans les pays et îles ayant un moindre accès aux carburants actuels (et futurs). C'est même l'un des paramètres prépondérants de l'activité atmosphérique sur le globe²¹.

Les principaux flux sont appelés les Alizés (easterlies), vents dominants permanents établis d'est en ouest au niveau des tropiques. Ils soufflent principalement du nord-est dans l'hémisphère nord et du sud-est dans

l'hémisphère sud. Les vents situés plus au nord ou au sud des Alizés sont des vents d'ouest (westerlies), qui soufflent principalement du sud-ouest dans l'hémisphère nord et du nord-ouest dans l'hémisphère sud. Ils sont plus forts et plus variables, surtout dans l'hémisphère nord, que les Alizés.

Les vents sont généralement plus faibles aux latitudes proches de l'équateur (zone de convergence intertropicale ou pot-au-noir), ce qui limite à ces endroits où la météorologie est instable, la puissance générée par les systèmes de propulsion par le vent.



— Vents ouest

— Alizés hémisphère nord

— Alizés hémisphère sud

*Présence des vents
sur les mers
Source : Wikipedia*

La navigation côtière est plus dépendante des conditions locales, car les trajets sont plus courts et le trait de côte peut limiter les possibilités d'ajustements de route. Cependant l'usage d'une propulsion par le vent reste la plupart du temps pertinent – la présence des brises thermiques en période estivale par exemple est largement à même de propulser les navires dès lors que leur vitesse d'exploitation est adaptée.

En Méditerranée, mer fermée, le vent présente de plus grandes irrégularités. A contrario, dans les Caraïbes ou la Polynésie, les vents sont relativement constants.

Prévisibilité

Les grands systèmes climatiques répartis sur le globe sont connus et permettent d'anticiper des routes maritimes aux conditions de vent intéressantes. De plus, la prévisibilité des conditions de vent est de plus en plus maîtrisée à toutes les échelles. Il est donc possible aujourd'hui d'avoir accès à des prévisions météorologiques fiables de 7 à 10 jours mais aussi d'avoir accès à de la donnée météorologique historique sur les 20 dernières années.

Les capacités de prévision sont en augmentation constante grâce à des puissances de calcul qui s'améliorent. Météo France par exemple change tous les 4 ans de moteur pour améliorer la qualité et la fiabilité des précisions en finesse et en profondeur, et cela représente 1 jour de prévision gagné tous les 10 ans.

Concrètement, il existe différentes échelles et différents types de modèles météorologiques : déterministes pour les précisions jusqu'à 5 jours et probabilistes jusqu'à 15 jours (détail : [22](#)). Ces prévisions à long terme (>15 jours) intègrent des interactions océan-atmosphère, couplent des

modèles par décade et comparent des anomalies par rapport à une normale.

Grâce au programme Européen « Copernicus Marine Environment Services » qui met à disposition du grand public des données météorologiques historiques particulièrement fines et représentatives (il s'agit de prévisions qui ont été recalées avec des observations), il est possible de vérifier les statistiques de vent sur toute la surface du globe. La force du vent est aussi appréhendée à l'échelle du navire. En effet, les systèmes de propulsion par le vent sont situés sur le pont des navires, qui peut être déjà 20 ou 30 m au-dessus du niveau de la mer, voire à une altitude de 100 à 300 mètres pour les systèmes de kite. Or, la vitesse du vent augmente avec l'altitude entre 0 et 500 m.

Pour cela, la donnée de base utilisée pour le vent est mesurée à une altitude de 10 mètres. A partir de relevés effectués sur un réseau mondial de points de mesure, des modèles numériques modélisent le vent depuis la surface de la terre jusqu'aux dernières couches de l'atmosphère, à 15 km d'altitude. Ces modèles sont validés par des lâchers de ballons deux fois par jour dans le monde entier (détail : [23](#)), et recoupés par des mesures satellitaires réalisées elles aussi deux fois par jour. De plus, entre 0 à 100 m, le profil moyen d'augmentation de la vitesse du vent a été largement mesuré par l'industrie offshore et éolienne. De 100 à 500 m, les résultats des modèles numériques ont été validés par des mesures Lidar.

Le changement climatique n'implique pas de perturbation majeure des grands systèmes de circulation atmosphérique pour les 50 années à venir. Si l'on attribue des changements météorologiques locaux au réchauffement climatique (el niño devient la niña) celui-ci n'impacte pas les grands systèmes de circulation atmosphérique connus et déjà en place. Ainsi, il n'y aura pas de baisse ou de perturbation majeure du vent dans ces derniers dans les 50 ans à

venir. Les saisonnalités restent elles aussi établies. Ce que l'on constate aujourd'hui, c'est une intensification en force plutôt qu'en fréquence des phénomènes de type cyclonique. Le réchauffement des océans fait évoluer légèrement les trajectoires de ces cyclones et maintient cette dynamique cyclonique en vigueur plus longtemps. Ainsi, les cyclones qui naissent au large de l'Afrique, traversent l'Atlantique grâce aux Alizés, gagnent en force dans les Caraïbes et remontent de plus en plus au nord le long des côtes américaines, dépassant la limite jusque-là établie du sud du New Jersey.

Là encore il est possible grâce aux données météorologiques historiques mises à disposition de vérifier les évolutions sur les dernières années et les tendances.

Optimisation par le routage

La grande répartition des vents est intéressante lorsqu'il s'agit de trajets transocéaniques ou avec une part de navigation en haute mer. Pour ces navigations, la pratique du routage météorologique permet de fortement pallier l'absence ou le manque de vent, et d'éviter les tempêtes.

La qualité des outils de routage existants fiabilise l'expédition maritime

Le routage météorologique est un exercice d'optimisation qui permet de trouver pour un navire déterminé et pour un voyage déterminé, la meilleure route en tenant compte des prévisions météorologiques et océanographiques, des courants et des contraintes opérationnelles.

Le routage était déjà largement utilisé par les marins professionnels à l'époque de la navigation à voile, grâce aux publications nautiques,

mais c'est par la course au large que les techniques et outils se sont réellement développés. Si ces outils ont été transférés de la course au large vers le shipping, la faible dépendance des navires marchands aux conditions de vent, et le besoin des marins professionnels orienté vers la sécurité plus que vers la performance font qu'ils n'avaient pas encore rencontré un grand succès. Ils permettaient une optimisation d'un seul critère à la fois, soit du temps de trajet, soit de la consommation du navire. Aussi, dans un souci de minimisation de la consommation, il est essentiel d'optimiser à la fois la route du navire et sa puissance moteur le long du voyage, ce qui complexifie le calcul et rend certaines approches traditionnelles obsolètes.

Les travaux réalisés ces dernières années sur les outils de routage météorologique permettent aujourd'hui aux utilisateurs de réaliser ce type d'optimisation de routes, visant à toujours respecter les engagements commerciaux des opérateurs et réduire au maximum la consommation de carburant en tirant le meilleur parti des systèmes de propulsion par le vent installés.

Utilisés à l'étape du design sur de la donnée météorologique historique, les algorithmes de routage permettent d'estimer la réduction de carburant qui est atteignable grâce à l'installation de systèmes de propulsion par le vent sur un tracé donné et ainsi qualifier le business model et le retour sur investissements.

Utilisé en mode opérationnel lors des navigations, le routage météorologique permet d'anticiper les mauvais états de mer ou les vents contraires pénalisants pour les systèmes non rétractables mais surtout d'anticiper les conditions météorologiques favorables à l'utilisation des systèmes de propulsion par le vent.

Plusieurs outils sont aujourd'hui à disposition des armateurs et opérateurs

Ces outils permettent soit de vérifier les statistiques de vent sur une route donnée, soit de simuler le gain potentiel de l'installation d'un système de propulsion par le vent sur le navire.

Par exemple, l'outil Blueroute (source :²⁴) de l'institut MARIN permet de tester un itinéraire avec un type de navire et d'appréhender les vents qui seront rencontrés selon la vitesse de celui-ci, sur l'orthodromie (route la plus courte).

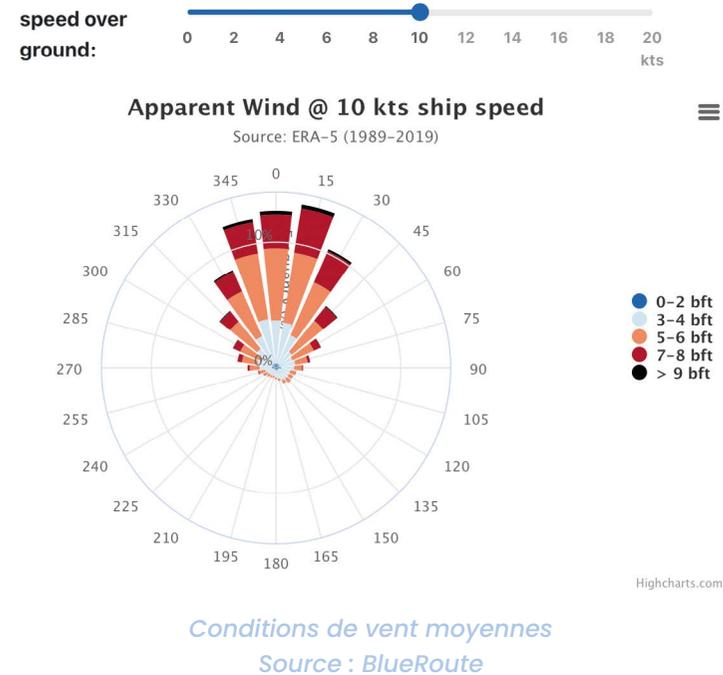
L'outil estime alors les émissions de CO2 qui seront émises avec le navire chargé ou sur ballast, avec ou sans l'utilisation d'une propulsion par le vent.

Sur l'exemple ci-dessous (extrait de l'outil Blue Route développé par Marin), on teste une route orthodromique entre Los Angeles et Guangzhou. Le navire considéré est un vraquier type Newcastlemax (du nom du port



australien exportateur de charbon), soit 50 m de large et 300 m de long. Il est considéré comme équipé de 4 rotors.

Sur cette route, le navire rencontrera principalement des vents apparents de 5 à 6 beauforts, dans des angles de 45°, pour une vitesse de navigation de 10 nœuds.

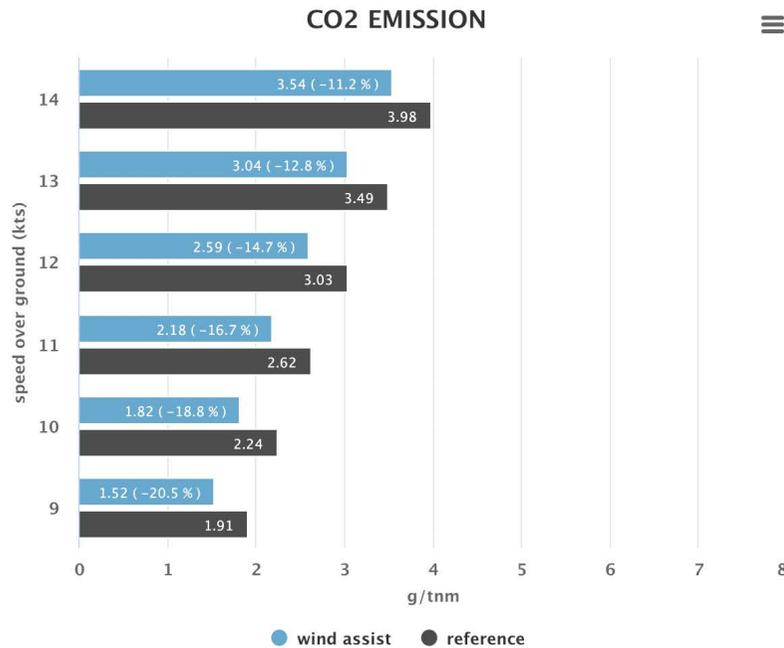


Il devrait économiser 11,7 à 22% d'émissions de CO2 grâce au vent selon sa vitesse de navigation lorsqu'il est chargé.



New Castle Max Bulk Carrier - Ballast

Configuration 4 Flettners



Economies de CO2 générées
Source : BlueRoute

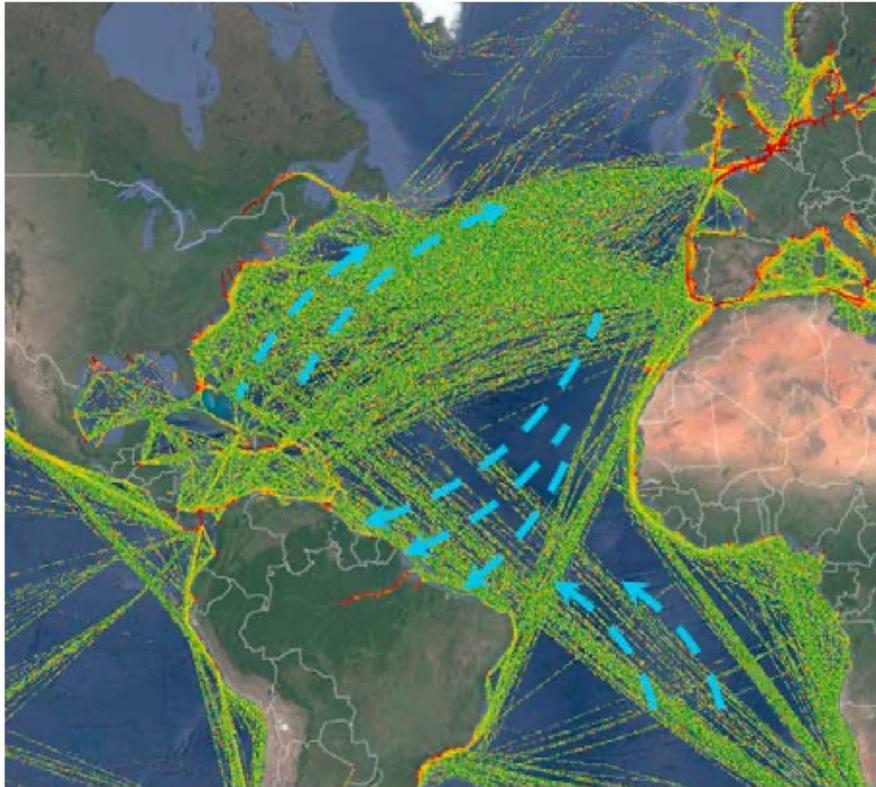
L'outil Satori (source : 25) de la société D-ICE Engineering propose de choisir différents types de navires, puis intègre l'effet des vagues, des courants et du vent, sur de multiples répétitions d'un trajet, afin d'estimer la part de puissance propulsive générée par le vent, et d'estimer ainsi les gains en matière d'économie de carburant, associés à l'utilisation combinée de routage et de propulsion vélique. Plusieurs bureaux d'études comme le CRAIN Technologies proposent aussi des méthodes numériques et expérimentales.

Certaines routes seront plus intéressantes que d'autres pour la propulsion par le vent

Comme le souligne la société de classification DNV dans une étude de 2019 (source : 26) : la disponibilité du vent en tant que source d'énergie est illimitée mais elle aura d'autant plus d'intérêt que l'on peut coupler les meilleures conditions de vent (constant en force et direction) avec une route maritime qui permet une certaine liberté de tracé.

Par exemple, des routes transatlantiques ou transpacifiques sont très intéressantes car le navire peut décider d'optimiser sa route en passant plus au nord ou au sud. Sur une route Europe-Asie, le navire contourne l'Europe, passe par la Méditerranée, le Canal de Suez, contourne l'Inde, pour embouquer le détroit de Malacca, ce qui constitue de relativement courts tronçons et laisse peu de latitude pour s'en éloigner, à moins de décider de passer par l'Afrique du Sud.

L'illustration ci-dessous montre l'intensité des parcours transatlantiques couplés aux alizés : les opportunités sont importantes pour la propulsion par le vent.



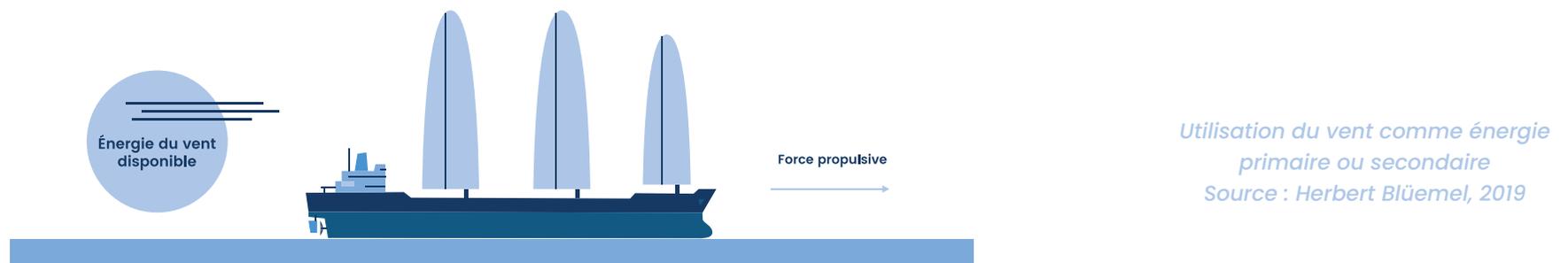
Routes maritimes transatlantiques et alizés
Source : DNV GL

Une réponse sérieuse à l'impératif de décarbonation

Facilité d'utilisation et réduction du besoin énergétique du navire

Les technologies mises au point convertissent immédiatement et intégralement l'énergie du vent en énergie propulsive sans perte de rendement intermédiaire. Cette énergie propre permet d'éviter toute émission polluante sur la part propulsive assurée, et donc de limiter l'émission polluante globale liée à la propulsion du navire.

L'énergie du vent ne nécessite pas d'être stockée à bord. Le système propulsif occupe cependant une place sur le pont, plus ou moins importante selon le type de technologie choisi.



Utilisation du vent comme énergie primaire pour propulser le navire

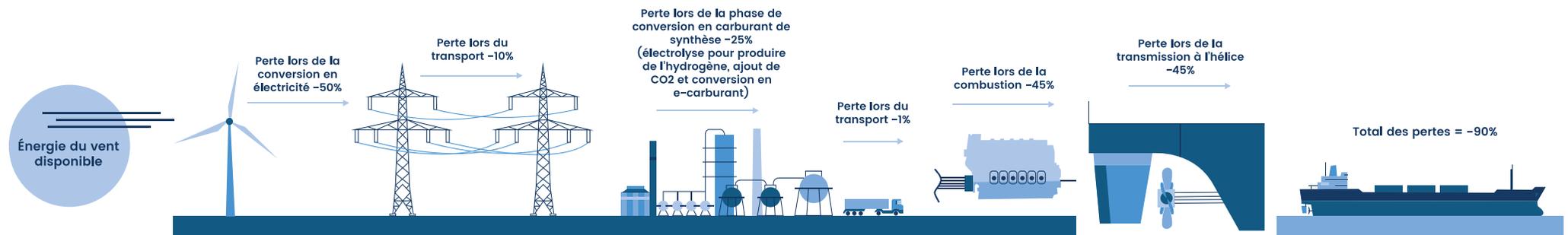


Schéma théorique de la production d'un carburant de synthèse à partir de l'énergie du vent pour alimenter un navire

L'utilisation de l'énergie du vent est silencieuse, ne dégage aucun polluant et n'ajoute pas de risque majeur particulier, par exemple d'explosion ou d'incendie.

Si le vent est largement disponible et prévisible, comme on le verra par la suite, il est aussi variable. C'est pourquoi, selon la vitesse de navigation ciblée et la route envisagée, il peut être utilisé en tant que source principale de propulsion ou en complément - grâce à une hybridation des propulsions.

Par ailleurs, l'un des grands atouts de la plupart de ces systèmes est leur

possibilité d'installation et de désinstallation sans changement structurel majeur de la coque, et sans une longue période d'immobilisation, voire sans mise à sec. Cela signifie qu'une grande partie de la flotte existante peut être rapidement équipée en retrofit.

Efficacité substantielle

La propulsion assistée par le vent est l'une des rares technologies offrant potentiellement des économies de carburant à deux chiffres dès aujourd'hui.

Les niveaux de décarbonation envisagés par les technologies développées actuellement vont de 5 à 20% en retrofit (rénovation, installation sur des navires existants), ce qui représente un gain substantiel essentiel à mettre en œuvre dès aujourd'hui sur la flotte existante au regard des enjeux de décarbonation.

Le niveau de décarbonation envisagé dans le cadre de la construction de nouveaux navires atteint 50% voire plus de 80% dans le cas d'une propulsion principale par le vent sur une ligne favorable pour des navires de taille moyenne et transportant des cargaisons de faible densité.

Empreinte carbone des technologies

Les technologies qui exploitent l'énergie du vent ont, elles aussi, une empreinte carbone, qu'il convient d'estimer. Une première étude publiée dans le cadre du projet de Wallenius (détail : ²⁷) montre que 99% des émissions sont liées à l'opération du navire. Aussi, même si l'installation d'une propulsion par le vent entraîne un investissement initial actuellement plus élevé (en raison du surcoût des prototypes) ainsi que des émissions lors de la phase de construction et démantèlement plus importante puisqu'un système supplémentaire est installé sur le navire, la réduction de la consommation de carburant permet des gains financiers et environnementaux qui positionnent la propulsion par le vent comme une solution de premier choix.

Puissance propulsive et conduite des navires

Une puissance significative

La puissance propulsive fournie par le système de propulsion par le vent dépend de :

- la vitesse du vent réel
- la vitesse du navire
- l'angle que le vent fait avec le navire
- la surface de propulsion exposée au vent
- la technologie utilisée.

La puissance propulsive atteint son maximum quand le vent perçu par le navire (vent apparent) arrive selon certaines plages d'angles, qui sont déterminées par la technologie concernée. Généralement, ce maximum est rencontré pour des vents apparents compris entre 50° et 100° par rapport à l'axe du navire.

Il convient de souligner que la puissance de propulsion dépend également de la surface du système de propulsion exposée au vent, ce qui signifie que pour disposer d'une forte puissance de propulsion, il est nécessaire de pouvoir installer un système de taille importante.

Il y a donc, pour chaque navire, un compromis à trouver qui doit tenir compte :

- de la zone de navigation prévue et du type de navigation (océanique, côtière, etc.) ;
- de la taille du navire et de sa vitesse commerciale prévue ;
- de l'espace disponible pour installer un système de propulsion par le vent ;
- de l'optimisation du navire en termes de forme de carène et d'anti-dérive.

Cette recherche de compromis nécessite souvent plusieurs itérations, et permet d'établir les éléments pour arbitrer en faveur de tel ou tel système de propulsion par le vent, et pour déterminer l'importance de l'apport du vent dans le mix énergétique du navire.

Pour illustrer la puissance d'un système avec des voiles souples classiques : un navire de charge de taille moyenne (11 000 tonnes de déplacement) et entre 130 m et 140 m de longueur nécessite environ 1 100 kW (efficace à la coque) pour être propulsé à une vitesse de 11 nœuds. S'il est équipé d'un gréement de 4 000 m² de voiles, le gréement délivrera en moyenne annuelle une puissance propulsive efficace de :

- 850 kW sur une route transatlantique, soit environ 77% du besoin propulsif.
- 550 kW sur une route au grand cabotage européen, soit environ 50% du besoin propulsif.

La puissance développée grâce à la propulsion par le vent peut ainsi être suffisante pour propulser de façon majoritaire des navires de charge.

Une conduite simple, optimisée grâce à la formation des navigants

Tout marin exerçant à bord d'un navire armé au commerce doit disposer des titres et attestations requis. Les brevets et certificats dépendent d'une norme internationale (détail :²⁸). Le code qui en découle établit un référentiel détaillé des compétences requises pour exercer chacune des fonctions à bord (capitaine, chef de quart passerelle, marin qualifié pont etc.). Il n'y a pas d'obligation en matière de formation des navigants pour la conduite des navires propulsés par le vent, et des navires propulsés par le vent sont déjà en opération sans accident relevé, en raison d'une maîtrise suffisante par les équipages.

Les technologies proposées aujourd'hui intègrent une automatisation des réglages, avec des procédures associées, qui ont fait l'objet d'analyses de risques. Cependant, d'une part, nous sommes en phase d'expérimentation des nouvelles technologies, et d'autre part, cette conduite sera optimisée si les gestionnaires des flottes et les navigants notamment en passerelle s'approprient pleinement le fonctionnement du gréement, afin d'appréhender au mieux l'équilibre entre vitesse et cap, en fonction des options de routage qui seront proposées. Enfin, l'enjeu de la mise en sécurité du navire en cas d'urgence est essentiel et les assurances demandent des preuves de la formation des marins en la matière.

C'est pourquoi l'association Wind Ship, l'École Nationale Supérieure Maritime et la société D-ICE Engineering, travaillent au développement d'un référentiel de formation pour la conduite optimisée des navires propulsés par le vent (détail :²⁹). Ainsi dès 2023, un module de formation continue théorique et pratique pourra être proposé aux opérateurs et à leurs marins. Météorologie, rappel des principes physiques de l'hydro et aérodynamique, et sécurité feront partie des sujets abordés pour une navigation optimisée et en sécurité.

Cette formation à la conduite des navires propulsés par le vent constitue aussi une extraordinaire opportunité pour le monde des navigants, qui peine à attirer les jeunes. Le retour d'expérience des marins sur les navires déjà équipés est extrêmement positif. Le responsable de Boomsma Shipping a remarqué l'intérêt de son équipage lors de l'équipement de son navire Frisian Sea avec des profils aspirés d'Econowind, et sa familiarisation rapide avec ceux-ci.

Retours d'expérience

Déjà quinze grands navires de charge propulsés par le vent

Pétroliers, rouliers, vraquiers, ferries, cargos ont été équipés grâce à des opérations de retrofit depuis 2018, exception faite du E-Ship 1 de Enercon équipé depuis 2010. Les technologies mises en œuvre sont des rotors, des profils aspirés et des profils épais (ailes rigides). Ces grands navires ont une longueur de 80 à 340 mètres. La moitié d'entre eux ont une jauge brute allant 4 000 à 10 000, et l'autre moitié, de 64 000 à 325 000 (minéralier équipé pour la compagnie VALE), ce qui représente au total un peu plus d'1 milliard de tonnes de port en lourd. Cette capacité devrait doubler d'ici 2025.

Ces navires croisent dans les eaux de mer du Nord, Baltique et Manche pour près de la moitié d'entre eux, mais aussi dans les Caraïbes, dans le Pacifique, dans l'océan Indien et Atlantique Sud jusqu'en Indonésie et en mer de Chine. (Voir page suivante)

Une vingtaine d'autres navires de plus petite taille sont équipés aussi d'une propulsion par le vent, et le secteur de la pêche commence à s'y intéresser.

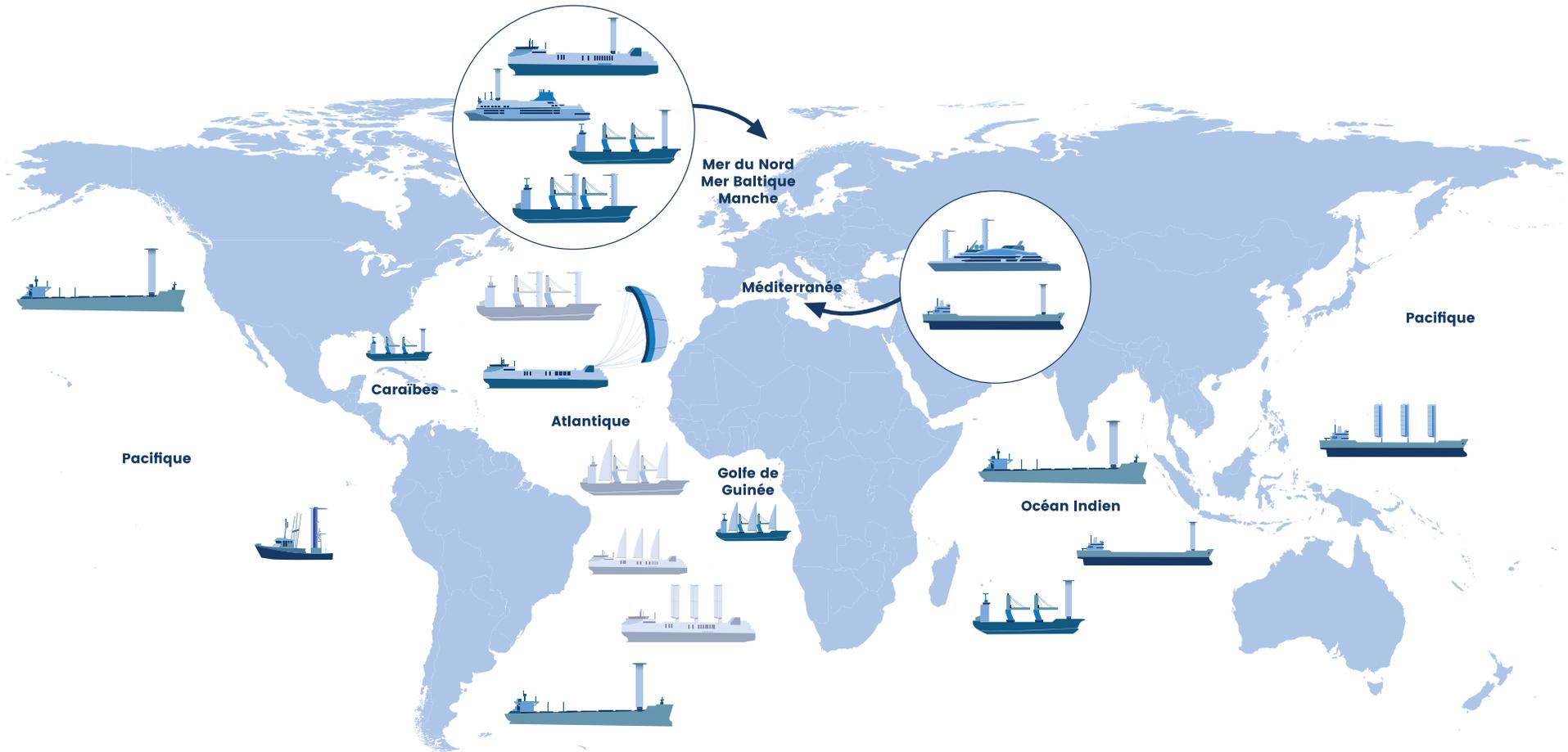
Le secteur de la pêche fait l'objet de nouvelles installations – un test est en cours sur le fileyeur Oceania d'une dizaine de mètres à Quiberon, avec un profil épais utilisé pour stabiliser le navire et améliorer sa tenue à la mer en marche comme en pêche, générant ainsi des économies de carburant – ou encore l'installation en juin 2021 d'un profil épais, rigide, de 12 m de haut sur un navire de pêche, le Balueiro Segundo, de 41m de long et 593t, un système approuvé par Bureau Véritas. Des équipements de kites sont aussi en cours de développement pour des usages spécifiquement dédiés à la pêche.

De premières validations des nouvelles technologies

C'est à partir de fin 2022 – début 2023 que des navires nouvellement construits et spécifiquement dessinés pour la propulsion par le vent et donc optimisés à cet effet seront mis à l'eau. Mais déjà, les témoignages des premières navigations à l'aide d'un rotor sont intéressants. L'E-Ship 1 a parcouru plus d'1,1 million de miles nautiques depuis son entrée en service, équipé d'une propulsion auxiliaire par le vent. Il transporte des composants à travers le monde entier. La propulsion par le vent lui permet d'économiser 20% de carburant par an en moyenne, soit 920 t de carburant par an (pour une vitesse moyenne de 13 nœuds).

Le Maersk Pelican équipé en 2018 a servi de plate-forme de test des performances pendant 1 an et affiche une économie de 8,2% en matière de consommation de carburant pour l'année, soit un équivalent de 1400 t de CO2. Ces performances ont fait l'objet d'une validation par la société indépendante Lloyd's Registers.

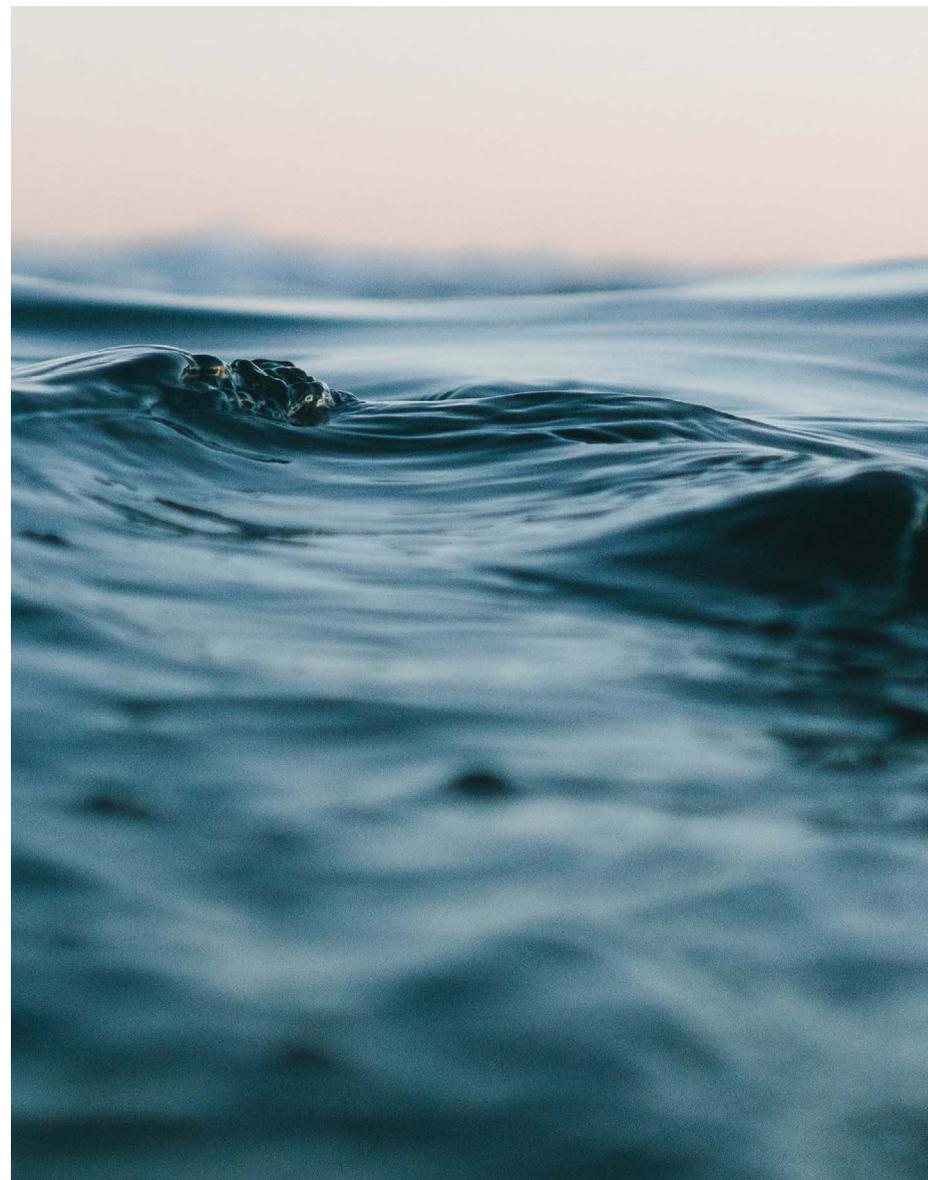
Quinze navires de charge équipés de propulsion par le vent dans le monde



													Navires actuellement équipés
Vraquier	Roulier	Pêche	Cargo polyvalent	Pétrolier	Ferry	Navire passagers	Rotor	Profil aspiré	Profil épais	Profil mince	Kite		Navires prochainement équipés

Ces premiers résultats sur des prototypes sont encourageants pour les futurs projets développés en France, qui visent des économies différentes selon les cas de figures (rétrofit, navire neuf, propulsion principale ou auxiliaire) et d'un niveau supérieur à ces premières performances, grâce à des technologies différentes.

Très régulièrement, les nouveaux concepts de navires propulsés par le vent sont proposés sur chaque segment du transport maritime, comme le vraquier du projet CHEK soutenu par l'Union Européenne, le porte-conteneur MELTEM, le pétrolier équipé du Wind Challenger, en acquérant régulièrement les approbations de principe des sociétés de classification, comme le porte-conteneur Trade Wings 2500 (d'une capacité de 2500 EVP) équipé de profils épais.



03 Quand le transport maritime renoue avec la propulsion par le vent

Les aspects opérationnels

Le profil « WAVE »

Le recours au vent permet d'envisager un niveau de décarbonation ambitieux mais la stratégie opérationnelle doit être globale : c'est ce que propose l'approche "WAVE".

WAVE est l'acronyme qui permet d'illustrer l'ensemble des mesures complémentaires qui permettront de minimiser l'empreinte carbone d'une l'expédition maritime tout en trouvant la meilleure adaptation vis-à-vis du profil opérationnel du navire* concerné.

- **Wind** : utiliser la propulsion du navire par le vent pour éviter les émissions polluantes et réduire le besoin énergétique du navire
- **Activity** : réaliser des optimisations opérationnelles telles que l'utilisation du routage, la réduction de vitesse, la gestion de la flotte et de l'expédition maritime, la formation des équipages...
- **Vessel** : améliorer le navire en lui-même grâce à un design optimisé, à la bonne gestion de l'énergie à bord, à la réduction de la puissance des moteurs, à l'utilisation de pare-brise, de lubrification par les bulles ...
- **Eco-carburants et éco-conception** : utiliser des carburants alternatifs issus d'énergies renouvelables et concevoir le navire de manière à minimiser son empreinte carbone.

La plupart de ces mesures sont optimisées lorsqu'elles sont cumulées. Ainsi, réduire la vitesse de navigation permet d'augmenter la part de propulsion par le vent et limite par ailleurs l'impact sonore sous-marin et le risque de collisions avec la faune. Par exemple, l'installation de 2 systèmes de propulsion par le vent et d'un pare-brise est peut-être plus efficace que 4 systèmes de propulsion par le vent. Il s'agit toujours d'équilibrer la recherche d'optimisation. Réduire la vitesse augmente le temps passé en mer : pour certaines cargaisons, cela ne pose aucun problème alors que pour des cargaisons réfrigérées, cela alourdira d'autant la facture énergétique et ce résultat sera à comparer avec le gain d'émissions permis en ralentissant la marche du navire.

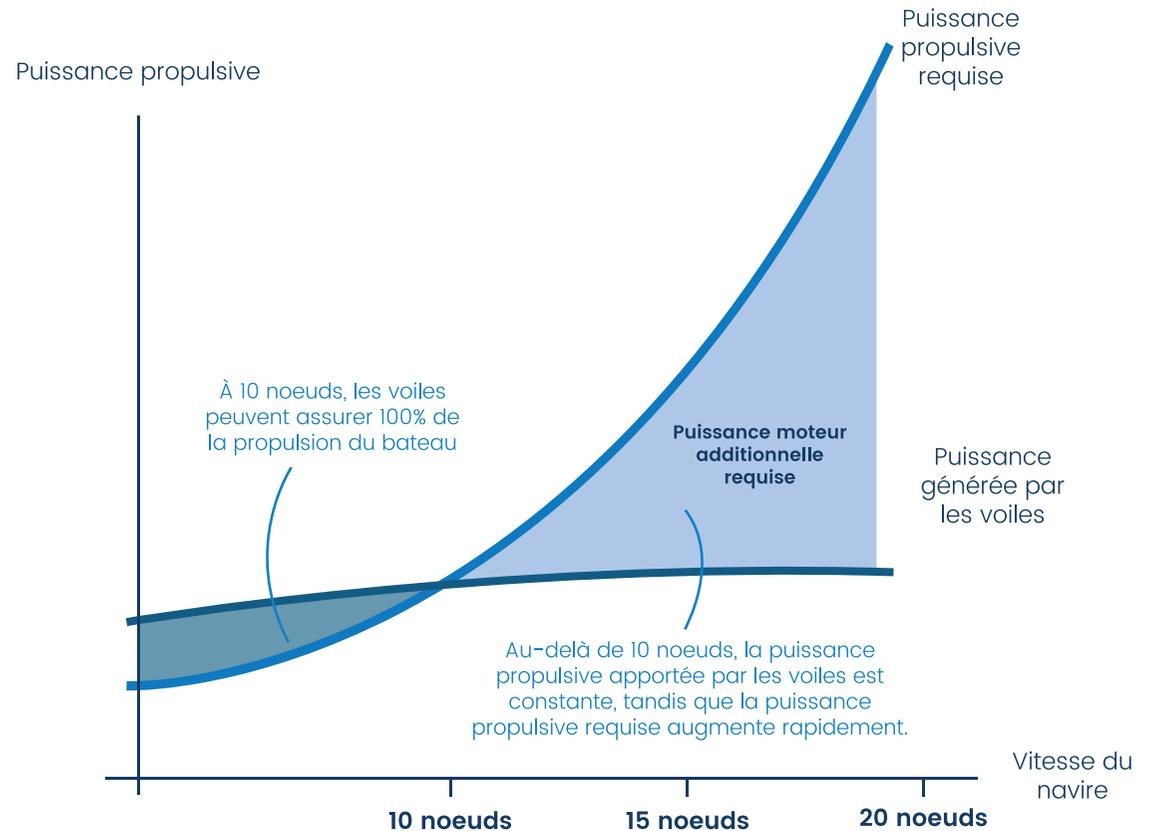
* Le profil opérationnel d'un navire reflète les différentes étapes de l'expédition maritime (voyage chargé, sur ballast, temps passé en mer, au port) ainsi que la vitesse de navigation et l'utilisation des moteurs principaux et auxiliaires.

Propulsion principale ou auxiliaire et choix de la vitesse de navigation

La propulsion par le vent peut être utilisée pour contribuer de manière principale ou complémentaire à la navigation. Une propulsion par le vent est considérée comme principale lorsqu'elle apporte plus de 50 % de l'énergie propulsive nécessaire pour réaliser une opération de transport entre les points de chargement et de déchargement. Au-dessous de ce seuil, la propulsion par le vent est considérée comme auxiliaire. Qu'elle soit principale ou auxiliaire, elle peut être associée à n'importe quel carburant.

La vitesse de navigation fixée par l'armateur est une donnée d'entrée de premier ordre pour définir le système de propulsion optimal pour son cas d'usage et estimer son potentiel d'économie de carburant. En effet, pour un vent donné et une technologie donnée, une puissance propulsive maximale est déterminée, et évolue en fonction de la vitesse du navire pour atteindre un maximum. Ensuite, comme le montre le graphique ci-après, la puissance propulsive ne peut plus augmenter. La propulsion par le vent sera donc maximisée dans des plages de vitesse de navigation modérées.

Vitesse et puissance propulsive générée grâce au vent



NB : la vitesse de 10 nœuds est utilisée dans ce graphique pour illustrer le propos, mais ne correspond en rien à une valeur absolue. Ce point optimal est à déterminer selon le type de bateau et de technologie

Ainsi, pour certaines technologies et certains trajets, une vitesse modérée permet de générer une propulsion principale par le vent. A titre d'illustration, un projet comme Neoline, considérant un gréement de voiles souples de 4000m², prévoit une vitesse commerciale de 11 nœuds permettant d'utiliser la force du vent pour près de 80% des besoins d'énergie propulsive (en moyenne annuelle).

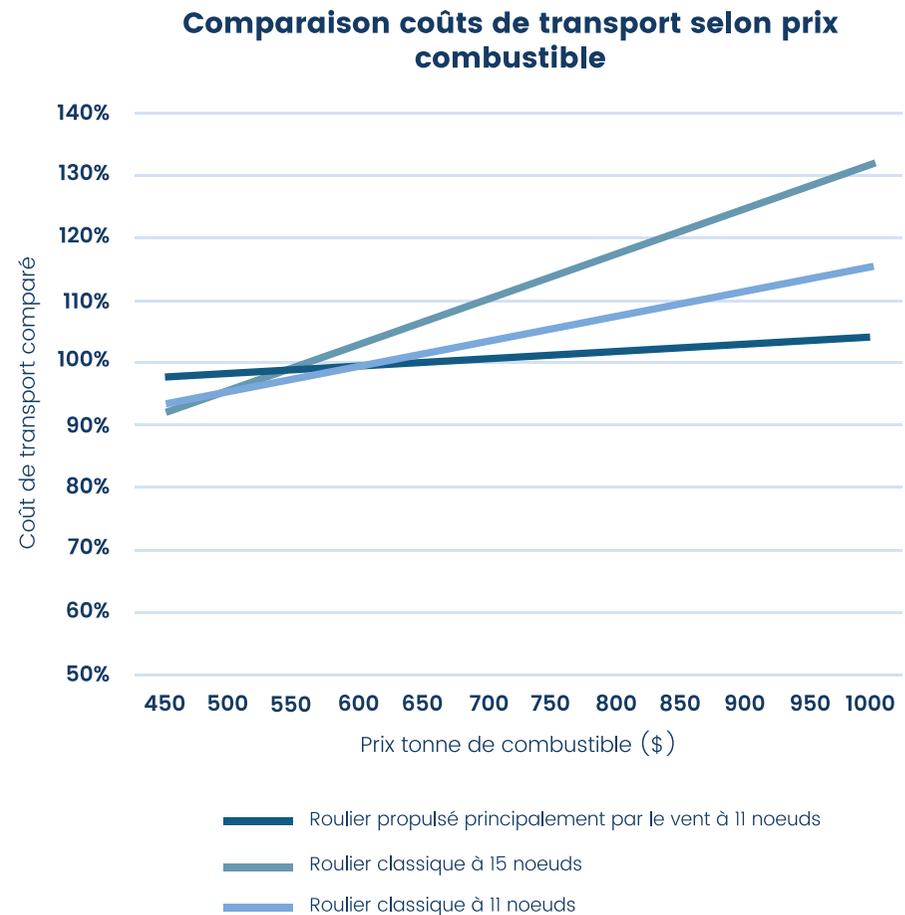
Pour d'autres technologies et projets, maintenir une certaine vitesse grâce à une motorisation complémentaire bascule le système en propulsion auxiliaire, mais permet de rencontrer des vents avec des angles relativement fermés, et de tirer le meilleur de la technologie installée. C'est l'exemple du projet Canopée, navire en cours de construction destiné au transport maritime des composants du lanceur 6 de ArianeGroup, qui sera équipé de 4 Oceanwings développées par la société AYRO.

Quel que soit le projet, de multiples simulations sont réalisées sur la base des routes qui seront empruntées, afin de déterminer le ratio optimal vitesse/économie de carburant. Celui-ci sert de base à l'opération du navire. Si le vent diminue lors d'un trajet, le moteur peut être utilisé pour pallier au besoin afin de respecter le temps de transit contractuel.

Diminution substantielle des coûts et stabilité des coûts de transport

Une flotte propulsée par le vent sera à l'origine d'économies substantielles. En effet, utiliser l'énergie du vent renforce l'autonomie et l'indépendance énergétique du navire vis-à-vis des carburants dont le coût sera important et volatil et la disponibilité moindre.

Le graphique ci-après montre une simulation réalisée pour un navire roulier dans différentes configurations : la part assurée par la propulsion par le vent permet d'assurer une stabilité du coût de transport.



Cela diminue aussi la facture liée aux équipements spécifiques (cuves, ...) qui seront nécessaires pour stocker à bord ces nouvelles énergies, ainsi qu'aux assurances associées notamment dans le cas de carburants alternatifs présentant des risques spécifiques.

Sécurité des marchandises

Les marchandises transportées grâce à une propulsion par le vent ne subissent pas un niveau de risque plus élevé que lors d'un transport sur un navire conventionnel. La stabilité du navire a été vérifiée et certifiée en amont par la société de classification. La traction ou la propulsion par le vent permet même d'appuyer le navire et réduit les mouvements de roulis, limitant les accélérations transversales et augmentant le confort de navigation pour l'équipage et le chargement.

Le processus d'intégration des systèmes aux navires

« La phase d'intégration est celle qui va transformer la simple addition d'un système propulsif par le vent en une véritable solution de décarbonation »

C. Hypousteguy, société Sofesid Engineering

Une étape déterminante

Installer un nouveau système sur un navire revient à intégrer une nouvelle brique dans le respect des règlements édictés par les sociétés de classification afin d'obtenir l'approbation de ces dernières que ce soit pour un navire neuf ou en retrofit. Cette intégration relève de multiples domaines : structurel, sécurité, gestion électrique, contrôle-commande, motorisation, etc.

C'est cette phase d'intégration qui détermine la portée finale de l'équipement du navire par une propulsion par le vent. Grâce à celle-ci, l'ensemble du navire est revu et adapté pour que l'investissement consenti dans la propulsion par le vent ne soit pas amoindri par d'autres réglages non adaptés. En particulier, il est capital que l'ensemble de la chaîne énergétique du navire soit revue et adaptée afin de tirer la meilleure efficacité énergétique possible dans toutes les situations opérationnelles.

Recours à des compétences existantes et organisation de l'intégration

Il existe sur le marché des sociétés compétentes pour réaliser ces phases d'intégration. Certaines s'appuient sur le savoir-faire qu'elles ont développé dans l'intégration de systèmes complexes sur navires dédiés au secteur pétrolier dont les systèmes de grues et d'engins de levage sont assimilables aux mâts utilisés dans la propulsion par le vent.

Cette phase d'ingénierie peut être portée par l'armateur, par l'équipementier ou par le chantier, voire par l'affrèteur qui souhaite accompagner ses armateurs dans le choix du meilleur compromis. C'est l'organisation contractuelle des responsabilités qui définit ce cadre et qui doit être anticipée autant que possible.

Anticiper pour réduire les coûts

Les premiers retours d'expérience pointent un recours parfois trop tardif à cette phase d'intégration. Pour être réellement efficace, et diminuer le coût de l'intégration en elle-même lors du chantier, l'ingénierie doit être déployée le plus tôt possible. Les montants épargnés en phase chantier grâce à l'identification et à la résolution des points durs en amont

peuvent se révéler très importants – et maintenir le ROI dans un niveau acceptable.

L'armateur peut faire réaliser en amont une approbation de principe par les sociétés de classification. L'investissement engagé pour ce travail permet de s'assurer que le projet répondra bien aux règles imposées par ces sociétés. Cela permet également de fixer des bases pour le concept: par exemple, le niveau de redondance exigé pour les systèmes, la disponibilité, le niveau d'automatisation, etc...

L'intégration permet de planifier le chantier et d'optimiser la phase d'immobilisation du navire. Les experts estiment aujourd'hui que l'installation des systèmes de propulsion par le vent en rétrofit peut avoir lieu lors des arrêts programmés tous les 5 ans, sans générer d'immobilisation supplémentaire. La connaissance du chantier, de ses moyens de levage, du nombre de pièces à installer, de leur poids etc. est essentielle pour tenir ces objectifs. Si elle n'est pas encore enclenchée en raison de la phase de prototype dans laquelle sont aujourd'hui la plupart des équipementiers, la définition en amont et la préfabrication d'éléments grâce à une mise en production industrielle permettra une grande réactivité.

Adopter une approche globale

L'intégration d'un système de propulsion par le vent concerne de multiples disciplines, mais ne nécessite aucune nouvelle compétence. Les expériences que sont en train de cumuler les sociétés travaillant sur les projets de propulsion par le vent permettront de proposer des organisations optimales pour dérisquer la phase d'intégration.

Sur des nouvelles constructions, une standardisation des opérations est envisageable – elle ne le sera pas dans le cas des rétrofits, qui sont trop spécifiques à chaque navire selon son profil opérationnel.

En revanche, cette intégration doit bien être réalisée comme une démarche d'ensemble, et non traitée sujet par sujet sans vision globale. Toutes les contraintes sont à examiner ensemble, et de manière itérative, afin de trouver le meilleur compromis entre les évolutions possibles du navire concerné. L'ajout de la propulsion par le vent, une technologie fiable et éprouvée, nécessite de penser le navire dans sa globalité pour tirer le meilleur parti de la chaîne propulsive.

Le choix de la technologie

Pour qu'un armateur ou un opérateur maritime puisse choisir la technologie qui lui semble la plus adaptée à ses opérations, il est nécessaire qu'il dispose d'outils permettant de prédire les performances des systèmes envisagés.

Outils de prédiction de performance existants

Plusieurs sociétés ont déjà la capacité de fournir des prédictions de performance en comparant différentes technologies. Par exemple, les premières versions de programme de prédiction des performances mis au point par D-ICE Engineering ont permis de réaliser des études complètes de comparaison des gains obtenus grâce à différents systèmes sur un même navire sur plusieurs routes. Une société comme SYROCO effectue un travail de comparaison des systèmes de propulsion par le vent sur une partie de la flotte de la compagnie CMA-CGM.

Il n'existe cependant pas encore de modèle totalement abouti de prédiction de performance pour tout type de navire, toute condition de mer et vent et toute technologie. Chaque développeur de technologie

ou concepteur de navire développe ainsi son propre modèle de prédiction de performance en s'appuyant sur des modèles numériques (CFD : Computational Fluid Dynamics) et des essais en soufflerie ou en conditions réelles sur des prototypes instrumentés pour établir le VPP (Velocity Prediction Program) du navire équipé de sa propulsion par le vent.

Un travail de normalisation est à mener afin de recenser les bonnes pratiques pour estimer les performances des navires (prise en compte des effets des forces latérales, des moments de lacet, des interactions avec le moteur ou entre les propulseurs et la superstructure du navire, etc) et de les harmoniser entre les acteurs. Des projets collaboratifs sont déjà en cours de développement pour aboutir à des outils validés par la communauté scientifique. Une thèse est en cours à l'École Centrale de Nantes, un projet industriel conjoint est lancé entre plusieurs partenaires européens, le projet WISP.

Suivi renforcé de la gestion de l'énergie à bord

Les performances opérationnelles ne relèvent cependant pas que d'un choix de technologie. Il est fréquent de constater que sur un trajet similaire, un même navire équipé d'un moteur thermique peut réaliser des dépenses ou au contraire des économies de carburant de l'ordre de 10 % en raison des conditions de vent et d'état de la mer et des décisions de navigation prises par le capitaine et l'équipage.

Cette variabilité pourrait s'amenuiser avec l'installation d'outils de suivi et de gestion de l'énergie à bord, permettant à l'équipage de mieux maîtriser la consommation de l'énergie – dans la mesure où celui-ci aura été formé et intéressé à cet enjeu.

Les limites actuelles de la comparaison

Difficile comparaison des technologies entre elles

Il n'existe pas encore de banque de comparaison des performances entre les technologies dans des conditions similaires d'opération. Les résultats qui sont agrégés doivent donc être utilisés avec beaucoup de précautions car la méthode utilisée pour estimer les économies de carburant peut varier considérablement.

Il n'est donc pas possible de tirer de conclusion immédiate sur la technologie de propulsion par le vent « la meilleure », mais la question à laquelle il faut répondre est plutôt de savoir quelle technologie est la plus adaptée à quel type de navire, pour quel type de route et quel est son potentiel.

Un travail de compilation des résultats issus de 12 études menées entre 2006 et 2019 sur les systèmes de propulsion auxiliaire par le vent a été réalisé dans le cadre du projet européen Interreg Mer du Nord, WASP (annexe 6). Les tableaux présentés (source : ³⁰) recensent les économies réalisées avec différents systèmes. Sans une méthodologie robuste et partagée permettant de formaliser les paramètres de premier ordre à considérer pour estimer les performances des navires, et sans itération des expériences dans des conditions similaires, il n'est pas possible d'interpréter ces résultats pour comparer des technologies entre elles.

Nécessité de tenir compte des routes envisagées et de la typologie de navire

Outre les aspects techniques, les performances des navires sont aussi dépendantes de la zone géographique considérée, de la route empruntée, du sens de navigation sur celle-ci et de la saisonnalité. De premières références s'élaborent, dont quelques illustrations sont rapportées ci-dessous. Ces références (présentées en bibliographie) s'enrichiront au fur et à mesure des nouveaux armements de navires propulsés par le vent, et constitueront une aide à la décision des futurs armateurs.

Les déplacements sur de longues distances présentent une variabilité plus faible en matière d'économie de carburant que sur de courtes distances et permettent d'économiser davantage de carburant, car la vitesse du vent a tendance à être plus élevée en haute mer.

Dans le cas de rotors, les économies de carburant sont les plus importantes sur la côte ouest de l'Europe, dans le sud de la mer de Chine, dans l'océan Indien et dans la mer d'Arabie, tandis qu'elles sont les plus faibles en Méditerranée et au large de la côte ouest de l'Afrique. D'autres études suggèrent également que selon les secteurs géographiques considérés, les économies de carburant sont sensiblement différentes.

Des différences saisonnières dans les économies de carburant ont été observées sur la ligne commerciale Argentine - Royaume-Uni où les

rotors fonctionnent mieux en hiver alors qu'un profil épais fonctionne mieux en été. En effet, en hiver dans l'hémisphère nord, la vitesse du vent est plus élevée et permet aux rotors de réaliser davantage d'économies de carburant.

La direction du voyage est aussi à prendre en compte. Ainsi, la direction dominante du vent d'ouest dans l'océan Atlantique a entraîné une différence significative dans les économies de carburant sur des trajets entre Baltimore à Wilhelmshaven (36 %) et Wilhelmshaven à Baltimore (14 %). Dans le cas du projet Neoline, les études de routage ont aussi montré que lors d'un trajet vers l'ouest (Westbound) le navire rencontrera des angles de vent apparent serrés (30 à 50°) alors que pour un trajet vers l'est (Eastbound), les angles de vent apparents sont plus dispersés, avec deux occurrences plus fortes entre 30 et 60° et entre 130 à 180°. Les économies de carburant générées seront donc différentes.

Maintenance des systèmes de propulsion par le vent

Des pièces robustes et standardisées

Une partie des technologies comme les profils épais rigides ou les profils aspirés privilégient la robustesse de l'équipement. Ainsi un bon tiers des solutions développées actuellement utilise du matériel industriel éprouvé, dont la durée de vie est équivalente à celle du navire (20 à 25 ans). Ces produits sont déjà utilisés dans le cadre des énergies marines renouvelables et sont éprouvés pour un usage en milieu marin, agressif et corrosif. Les gréements ainsi mis en place ne font pas l'objet d'une instrumentation métrologique spécifique. Ils comportent relativement peu de capteurs et d'électronique, ce qui réduit les sources de panne.

Quelques pièces d'usure seront à remplacer (roulements, par exemple) sans difficulté particulière du fait de l'existence de ces pièces en standard dans l'industrie, et sans nécessité d'immobilisation du navire.

Des éléments textiles nécessitant un renouvellement différent selon l'usage

D'autres technologies comme les profils épais semi-rigides font appel à des enveloppes ou éléments textiles associées. On peut estimer qu'un renouvellement de ces enveloppes ou de ces éléments serait à envisager après 3 à 6 ans d'utilisation selon le matériau employé. Beaucoup d'efforts portent aujourd'hui notamment sur la résistance aux rayons UV, un des principaux facteurs de fatigue des textiles.

Enfin une partie des technologies comme les kites utilise un matériel textile qui nécessitera un renouvellement très dépendant de l'usage qui en sera fait. Pour un usage intensif, c'est un taux de renouvellement

annuel qui sera à envisager. Ces changements peuvent être réalisés en maintenant le navire en opération.

Inspections

La maintenance des équipements comprend une inspection visuelle périodique régulière (tous les 6 mois) des composants de l'équipement, et l'entretien usuel des éléments mécaniques voire des peintures. Cette maintenance peut être réalisée par l'équipage et est équivalente à celle proposée sur des produits industriels classiques (vérification des roulements, lubrification des composants...).

En fonction des niveaux de certification obtenus par le navire, une inspection annuelle dans le cadre de celles menées habituellement sur tout navire est généralement requise par les guides des sociétés de classification édités sur les navires propulsés par le vent (ABS, BV, DNV, Class NK) concernant l'état des structures du système de propulsion pour détecter toute déformation, usure excessive, corrosion...

Révision

Une révision approfondie tous les 5 ans, correspondant à la périodicité des arrêts techniques réglementaires, est prévue pour vérifier les éléments mécaniques et le changement des pièces d'usure selon les référentiels des sociétés de classification.

Par ailleurs, la vérification générale des automatismes peut être proposée par le fournisseur à l'armateur via la mise à disposition d'une équipe mobile dédiée. L'amplification du marché sur les grandes places maritimes internationales verra se développer des propositions locales de maintenance de ces équipements, dans le cadre d'accords avec le fournisseur.

Maintenance préventive

Des outils de supervision, de mesure et d'analyse de condition sont étudiés afin de permettre une maintenance préventive. Il s'agit de détecter des défauts pour les corriger avant que leur criticité soit importante, de déclencher des modes dégradés pour préserver le matériel et d'évaluer la durée de vie restante. Ce sont des facteurs importants pour la réduction des coûts opérationnels, la maximisation des performances et la valorisation des actifs.

Évolutions à prévoir

Certification des performances

L'un des enjeux pour accélérer l'adoption des technologies de propulsion par le vent est la certification par une tierce partie des performances attendues, afin de permettre à l'armateur de faire un choix éclairé, et au financeur d'investir dans un niveau de risque clair. Les acteurs que sont les sociétés de classification et les bureaux d'ingénierie maritime développent actuellement des services en ce sens.

Plusieurs bureaux d'ingénierie travaillent sur l'évaluation des performances en utilisant des simulations à l'aide de jumeaux numériques des navires, ou des simulations multiphysiques.

Les sociétés de classification sont ensuite sollicitées pour valider les résultats d'études menées sur la performance d'un système – que ce soit par les développeurs de technologies, ou par les bureaux spécialisés. La société de classification va juger de la valeur de ces résultats en examinant la qualité de la méthode mise en œuvre.

Il n'existe pas encore de guide en matière de méthode d'évaluation

des performances des systèmes de propulsion par le vent. Un travail collaboratif pour forger une doctrine partagée permettrait aux développeurs de rendre leurs études plus robustes, et aux évaluateurs de fiabiliser leur processus.

Prise en compte de la propulsion par le vent dans les règles internationales

Les apports de la propulsion par le vent sont pris en compte dans les calculs actuels des indices d'efficacité énergétique des navires (EEDI, EEXI), ou d'intensité carbone (CII) – et le sont aussi dans les futures réglementations européennes (indice d'intensité en GES). La propulsion par le vent est donc valorisée pour améliorer les résultats des navires.

Les lignes directrices MEPC.1/Circ.815 présentées à l'OMI en 2013 précisent comment prendre en compte les effets des technologies innovantes telles que les systèmes de propulsions par le vent dans l'EEDI. Cela s'appuie sur une matrice de probabilité des vents (annexe 7) ainsi que sur un guide technique définissant les essais de performance pour obtenir la matrice des forces propulsives du système de propulsion par le vent.

De nouvelles recommandations viennent d'être adoptées à l'OMI afin de fournir les méthodes de calcul les plus robustes possible pour la meilleure prise en compte des apports de la propulsion par le vent dans les indices. Cela passe notamment par des tests en soufflerie lorsque cela est pertinent, tout en évitant des préconisations extrêmement coûteuses comme le fait de réaliser des tests systématiques sur des coques équipées de propulseurs. Des définitions plus précises des méthodes de calcul à utiliser par les sociétés de classification sont aussi proposées pour qualifier les systèmes. Ces recommandations seront validées par l'OMI lors des prochains comités de protection de l'environnement. Elles seront a priori aussi applicables à l'EEXI.



Dans un contexte de réglementations de plus en plus strictes sur les émissions de gaz à effet de serre et une attente vis-à-vis de l'urgence de la crise climatique, la propulsion par le vent est une solution à fort potentiel qui peut contribuer à la décarbonation à long terme de l'industrie maritime.

Nous savons que l'énergie du vent, même si elle n'est pas toujours disponible, peut apporter une contribution significative à la propulsion et à la conception de navires propres. Les systèmes de propulsion par le vent peuvent jouer un rôle auxiliaire important en fournissant une énergie de propulsion substantielle et, dans certains cas, le vent pourrait être utilisé pour la propulsion principale. Beaucoup d'options sont possibles, certaines en sont à leurs balbutiements, mais l'approche attentiste est intenable. L'atout le plus important de l'industrie sera l'information et la collaboration, qui soutiendront à la fois l'innovation et la prise de décision, et c'est là que les sociétés de classification comme Bureau Veritas peuvent jouer un rôle clé. Notre expertise et nos connaissances dans l'élaboration de directives techniques complètes et de règles pour les navires, combinées à notre étroite collaboration avec les fabricants, nous ont permis de publier des règles spécifiques pour les systèmes de propulsion vélique et de proposer des notations de classe WPS1 et WP2 pour les navires équipés de systèmes de propulsion vélique. Ces règles rendent possible une innovation sûre, en guidant les armateurs, les chantiers navals et les fournisseurs de technologie. De plus, notre position neutre nous permet de fournir des idées et des informations qui soutiennent les décisions clés auxquelles sont confrontés les armateurs et les exploitants, sans prôner une solution en particulier, notamment parce que la solution optimale pour chaque armateur peut être différente selon son activité, ses navires et leurs routes commerciales.

Aude Leblanc,

*Technology Leader, Sustainable Shipping
Bureau Veritas*

Délivrance des certificats de navigation

Les réglementations internationales (SOLAS, COLREG notamment) qui encadrent la navigation de travail permettent l'utilisation de la propulsion par le vent mais ne la traitent pas spécifiquement. C'est l'Etat du pavillon qui complète l'analyse réglementaire sur ce point. Les divisions techniques précisent les dispositions applicables sous pavillon français. Ainsi la division 221 qui reprend la SOLAS prescrit que le navire sous pavillon français doit pouvoir rester manœuvrable et avancer à 7 nœuds dans des conditions de beau temps et mer calme, ce qui impose de fait une installation moteur et des réservoirs suffisamment importants pour réaliser la traversée souhaitée.

Les questions liées à la visibilité ou à la manœuvrabilité sont étudiées au cas par cas et résolues par l'installation de radars comme c'est déjà le cas pour les porte-conteneurs par exemple et par la mise en sécurité du système de propulsion vélique pour éviter tout effort. Les analyses de risque comprenant notamment les effets de la propulsion par le vent sur la stabilité - l'impact en matière de gîte pour la cargaison ou les passagers, sont revues par les sociétés de classification, qui valident les dimensionnements proposés.

Le sujet le plus délicat aujourd'hui est lié à la stabilité du navire, car les critères actuels imposent de simuler des conditions extrêmes qui ne seront pas rencontrées en réalité car la propulsion par le vent aura déjà été stoppée et mise en sécurité. Une gestion au cas par cas avec l'administration du pavillon permet d'appliquer ces critères de manière réaliste.

Notation par les sociétés de classification

Les grandes sociétés de classification (BV, ABS, Class NK, DNV, LR) ont mis à jour leurs référentiels. Des notations spécifiques liées aux navires

propulsés par le vent (Wind Assisted Propulsion Ship) ont été élaborées. De nombreux concepts ont déjà été approuvés.

Assurance des flottes

L'assurance accompagne au quotidien le monde maritime, un rôle majeur parfois peu connu. Une fois acté le choix d'un navire propulsé par le vent, il s'agit de pouvoir l'assurer sous de bonnes conditions. Le monde de l'assurance évolue, tout comme celui de la finance, vers l'intégration de plus en plus de projets responsables dans ses activités. Si la lumière est régulièrement portée sur l'hydrogène ou les carburants de synthèse, la propulsion par le vent est loin d'être exclue des discussions, et elle est bienvenue pour de grands assureurs.

L'assurance maritime va couvrir classiquement tous les risques liés à la construction et à l'exploitation des navires, avec différentes garanties notamment corps et machine pour les dommages subis en cas d'abordage, de heurt, d'incendie, les pertes financières consécutives à ces dommages et l'assurance responsabilité (protection & indemnity ou P&I) concernant les dommages causés aux tiers.

Les grands apériteurs du marché sont intéressés par les premiers projets et travaillent pour proposer des offres sur mesure. Pour affiner les cotations, leurs experts doivent disposer d'éléments techniques permettant de définir le niveau de risque et donc de souscription associée : fonctionnement des nouvelles technologies et notamment des automatismes, maintenance et durée de vie des systèmes, risque opérationnel lié par exemple aux phases de chargement et déchargement, moyens et coûts de réparation des systèmes ou encore formation des marins.

Un travail est donc engagé au fil des projets avec les courtiers spécialisés et les assureurs corps et P&I, afin que la réponse assurantielle couvre

précisément les risques. Certains vont être moins importants que pour des navires conventionnels - comme le risque pollution lié au volume de carburant en soute, ou l'avarie moteur, celui-ci étant moins sollicité. D'autres risques sont à évaluer précisément, comme la capacité à disposer de pièces de rechange ou à réparer le navire sans l'immobiliser en cas d'avarie sur le gréement.

Au fur et à mesure des expériences qui seront engrangées par les projets, les assureurs seront en capacité de proposer des polices avec des termes spécifiques à la propulsion par le vent, voire d'adopter une politique de prix pro-active pour les navires utilisant l'énergie du vent.



04 Perspectives de développement industriel

Un très fort potentiel

Importance du marché mondial

La flotte mondiale est concernée par l'obligation de développer des solutions de propulsion plus propres. Si la propulsion par le vent n'est pas optimale dans toutes les circonstances, elle peut s'intégrer à de très nombreuses situations.

Deux études estiment la taille du marché mondial pour la propulsion par le vent.

La première, menée en 2016-17 pour le compte de la Commission européenne et sa direction Climat (source : ³¹), estime que si de premières installations de propulsion par le vent ont lieu en 2020, il y aura 3 700 à 10 000 navires équipés d'ici 2030, permettant d'éviter l'émission de 3,5 à 7,5 millions de tonnes de CO₂ et générant 15 à 18 000 emplois. Cette étude a été menée avant que l'OMI ne construise sa stratégie de réduction des émissions de gaz à effet de serre, donc en l'absence d'objectifs de réduction des émissions. De plus, elle n'avait étudié que 4 technologies, ne couvrant donc pas toute l'étendue des possibilités ouvertes actuellement.

La seconde étude (source : ³²), réalisée pour le gouvernement du Royaume-Uni, estime que 40 à 45% de la flotte mondiale pourrait être équipée d'une propulsion par le vent d'ici en 2050, soit 37 000 à 40 000 navires, en raison du moindre coût de cette propulsion et de sa large disponibilité.

Facteurs favorables à une croissance rapide de la demande

Le coût du pétrole, les injonctions réglementaires et la pression des banques sur les armateurs sont les premiers moteurs des évolutions. L'ouverture de lignes secondaires avec de plus petits navires, la demande des clients du transport maritime qui souhaitent une offre correspondant à leur haut niveau de responsabilité sociale et environnementale et l'adaptation du contexte portuaire à la propulsion par le vent sont aussi des facteurs qui favorisent le recours à cette dernière.

Montée en puissance des lignes secondaires et du cabotage

L'optimisation des flux de marchandises à moindre coût a été opérée grâce à leur concentration et leur massification. Le recours aux conteneurs a facilité ces évolutions pour les produits manufacturés. La taille des navires a augmenté, assumant plus d'escales mais moins de temps dans les ports. L'optimisation des coûts pour le transporteur maritime ne

se répercute pas forcément sur les opérateurs des ports et transports intérieurs, qui ont la nécessité d'augmenter la capacité en camions, en espaces portuaires, en connexions intermodales, en investissements pour le dragage et les grues de plus grande capacité, ni sur le chargeur dont le taux de fret ne baisse pas forcément.

La pandémie expérimentée en 2020 rebat les cartes et un changement de paradigme pourrait voir le jour afin de mieux gérer les risques et de renforcer la résilience (source : 33). Le modèle établi du "juste à temps" pourrait alors être réévalué pour inclure ces nouvelles considérations. Diversifier les sources d'approvisionnement, l'acheminement et les canaux de distribution devrait gagner en importance. Cela amène d'ailleurs un certain nombre de compagnies maritimes et d'opérateurs portuaires à s'intéresser aux opportunités commerciales qui peuvent exister dans la chaîne d'approvisionnement par le biais de la logistique terrestre.

Aussi, les grandes organisations en hub-and-spokes qui relient des nœuds vers un centre de transbordement perdureront vraisemblablement pour les plus grands navires. Mais il semble envisageable de voir émerger des lignes secondaires, desservant des ports secondaires, rapprochant les biens transportés par la mer des zones de chalandises, grâce à une desserte utilisant des navires de moindre taille. La fin du recours aux énergies fossiles et l'usage des énergies renouvelables pourraient aussi redistribuer les routes maritimes. Les exigences régionales en matière d'expédition pourraient augmenter fortement, créant de nouvelles routes commerciales avec des colis de plus petite taille et une période de forte croissance de la demande de navires rouliers, de petits porte-conteneurs et de vrac secs (source : 34).

C'est ce que propose une partie des projets d'armements propulsés par le vent : la capacité des navires correspond à cette nouvelle demande en faisant escale dans des ports qui ne peuvent être desservis par les plus

grandes unités. La déconcentration des flux de marchandises, facteur important pour la réduction des coûts, est alors compensée en partie par le rapprochement entre la marchandise à transporter et son lieu de production ou de livraison. Il serait intéressant d'estimer la plus-value économique et sociale amenée dans ces ports secondaires du fait de l'arrivée de navires marchands, en matière d'emplois, de revitalisation de la vie maritime sur les façades des côtes françaises.

Demande des intermédiaires dans le cadre de leur politique de RSE

Pour réussir à optimiser des flux qui sont éclatés sur la planète, la plupart des entreprises font appel à des intermédiaires pour la phase de transport. Ces intermédiaires : commissionnaires, transporteurs, consignataires, sont chargés de mener les opérations de chargement, déchargement, groupage, d'acheminement, surveillance, opérations douanières... Les enjeux environnementaux assumés dans le cadre de la responsabilité sociétale des entreprises commencent à résonner dans les souhaits de certains clients. A ce jour, c'est surtout dans les secteurs des produits à haute valeur ajoutée que le sujet est le plus mature. Ces intermédiaires doivent à leur tour avoir la capacité de proposer des alternatives telles que des lignes maritimes couvertes par la propulsion par le vent. Les besoins existent et augmenteront une fois que les premiers chargeurs auront expérimenté ce transport et validé leur niveau de confiance dans la maturité des technologies pour mener à bon port et en temps voulu les biens confiés au transporteur.

Adaptation des métiers et du contexte portuaire à la propulsion par le vent

La présence éventuelle de mâts (ce n'est pas le cas lorsqu'un navire est équipé de kites), qui peuvent souvent être rétractés ou rabattus, ne devrait pas nécessairement obliger à investir dans de nouveaux

matériels de manutention spécifiques. En revanche, un accompagnement de ces projets auprès des acteurs portuaires est nécessaire.

Les lamaneurs qui assurent les opérations d'amarrage et d'appareillage ne devraient pas voir de problématique particulière pour l'accostage de ces navires, qui seront tous équipés de moteur pour les manœuvres. Les pilotes embarqueront à bord de navires dont la propulsion par le vent aura été stoppée pour que le moteur prenne le relais dans les manœuvres d'approche. Ce corps de métier a par essence une grande capacité d'adaptation à tout type de navire, et réalise une veille permanente sur les évolutions en cours. D'éventuelles formations pourront facilement être mises en place si le besoin s'en fait sentir. Enfin les manutentionnaires responsables des phases de chargements et déchargements devront être attentifs aux gréements présents sur le pont des navires, mais cela ne représente pas de difficulté particulière pour des équipes habituées à opérer dans de multiples contextes d'encombrement.

Une opportunité pour la France

La France dispose de 20 000 km de côtes et 10,2 millions de km² de surface maritime sous sa juridiction ou sa souveraineté et le transport maritime est une composante forte de son économie (annexe 8). Les compétences navales et nautiques françaises ont perduré tandis que d'autres filières telles que l'aéronautique et le digital lui permettent de se positionner parmi les leaders de la transition.

Elle peut s'appuyer sur ces atouts pour devenir une référence mondiale de la propulsion par le vent, tant dans l'équipement des navires que dans l'utilisation d'une flotte utilisant ces technologies.



Comment ne pas être enthousiaste à l'idée d'un transport de marchandises à la voile, contribuant à la décarbonation du maritime, et plus particulièrement pour les territoires d'Outre-mer, dont la biodiversité marine exceptionnelle mérite d'être préservée ?

Il n'est pas question de se complaire dans une relecture de l'Histoire mais plutôt de s'inspirer des anciennes routes maritimes, de la connaissance des vents, à allier avec les nouvelles technologies disponibles aujourd'hui ou à venir car en phase recherche & développement.

La navigation à la voile dans les archipels et sous les alizées a longtemps été une tradition, comment ne pas penser aux Polynésiens, et devient une réalité avec de beaux projets Outre-mer, tels que le transport des modules de la fusée Ariane entre l'Hexagone et la Guyane avec le navire Canopée, la route Canada-France qui passera par St Pierre et Miquelon, ou encore les compagnies TOWT et Grain de Sails qui effectuent des rotations entre la Caraïbe et les ports français de la façade Atlantique Est pour transporter des produits manufacturés ou d'épicerie fine. Gageons que la dynamique enclenchée puisse continuer à se développer, pour un transport plus durable !

*Alexandre Łuczkiwicz
Responsable des relations et
des actions Outre-mer
Cluster Maritime Français*



Les enjeux de transition énergétique et de décarbonation de l'industrie et des transports incitent les Industriels de la Mer à innover en proposant des solutions vertes aux acteurs maritimes, au premier rang desquels les armateurs. Les objectifs de réduction des émissions de polluants de nos navires sont à la fois un défi et une opportunité pour notre industrie. Un défi, car nous devons travailler de concert l'amélioration, la fiabilisation et l'industrialisation des technologies et le modèle économique permettant l'adoption massive de ces solutions. Une opportunité, dans la mesure où ils contribuent au développement industriel, technologique et d'emplois de nos territoires. Plusieurs projets de démonstrateurs intégrant la propulsion par le vent émergent en France et constituent des références majeures pour les navires tant de petites que de grandes dimensions. L'enjeu est la mise en ordre de marche d'une industrie forte pour conquérir un marché porteur, dans lequel la construction navale française peut se positionner dès maintenant comme un leader mondial. Le soutien à la recherche et le développement liés à ces technologies mais surtout à l'industrialisation et la production des propulsions par le vent (véliques, rotors, par kites, par éoliennes..) garantiront la réalisation sur le territoire national de la majeure partie de la valeur ajoutée de ces navires. Plusieurs acteurs navals français préparent dès aujourd'hui le savoir-faire et les technologies nécessaires au développement de ces projets en lien avec les priorités du plan de relance (ie. Ecologie, Compétitivité et Cohésion territoriale).

Philippe MISSOFFE

Délégué Général du Groupement
des Industries de la Construction Navale

Des enjeux mobilisateurs

Décarboner le transport maritime domestique

Bien que le transport maritime soit très largement international, les échanges nationaux ne doivent pas être négligés. Le CITEPA, centre technique de référence en matière de pollution atmosphérique et de changement climatique, estime à 1,1 million de tonnes de CO₂ les émissions du transport maritime national, c'est-à-dire pour les trajets entre 2 ports français en métropole et certains territoires outre-mer : Guadeloupe, Martinique, La Réunion, Guyane, Mayotte, Saint-Martin, en 2020. Ces émissions représentent 1% des émissions totales du transport français (source : 35).

L'objectif de la neutralité carbone implique une décarbonation complète des transports maritimes et fluviaux, en facilitant la conversion aux technologies bas-carbone comme la voile (ainsi que les batteries, biocarburant, hydrogène). Il est aussi prévu d'encourager le report modal en matière de fret vers des modes alternatifs à la route.

Par ailleurs, les territoires outre-mer sont les premiers vulnérables face à une moindre disponibilité et un coût élevé de carburants alternatifs, alors même que le transport maritime est essentiel pour eux. La flotte de Polynésie Française, par exemple, a une moyenne d'âge de 35 ans et son renouvellement par des navires utilisant la propulsion par le vent est donc d'actualité.

Mobiliser les savoir-faire et les ressources humaines de l'aéronautique

Certaines filières industrielles sont fortement liées aux énergies fossiles et doivent se réinventer. C'est le cas de l'industrie aéronautique française, qui s'est d'ailleurs déjà associée au développement de projets de

technologies de propulsion des navires par le vent. Ses compétences en matière de conception (modélisation, simulation numérique, algorithmes de contrôle commande), de fabrication et de maintenance de systèmes complexes apportent un net avantage compétitif.

Alors que l'aéronautique traverse une crise importante, elle pourrait être la clef d'une large adoption des technologies françaises par la flotte mondiale, en mettant sa capacité à industrialiser des systèmes critiques tout en garantissant des coûts de production maîtrisés et une fiabilité démontrée.

Développer les innovations issues du nautisme

La filière française du nautisme est également riche d'entreprises capable de créer des passerelles avec l'équipement des navires marchands pour la propulsion par le vent, par exemple en adaptant des techniques issues de la course au large. Le cabinet VPLP a ainsi proposé un concept d'aile reprenant une innovation développée pour l'America's Cup.

Le bureau d'études Mer Forte, à la croisée du nautisme et de la construction navale, est capable d'évaluer rapidement le potentiel de développement d'innovations peu matures et de les faire évoluer à l'aide d'outils de calcul et de conception pour les faire entrer dans le marché. MerConcept, devenue entreprise à mission, souhaite résolument mettre son savoir-faire dans la conception de navires complexes et innovants aussi au service du monde maritime en accompagnant des transferts techniques entre la course au large et la marine marchande.

Les deep techs spécialisées telles que D-ICE Engineering, MaxSea ou Syroco sont très utiles au développement des projets par leurs travaux sur la simulation dynamique du comportement des navires, les logiciels embarqués et le routage. Ainsi, D-ICE Engineering équipe le navire

CANOPÉE avec son logiciel OCEANICS et MaxSea accompagne le projet Airseas.

Structurer une filière à fort potentiel de développement

Toutes ces opportunités permettent d'envisager la propulsion par le vent comme une filière d'avenir puissante et créatrice d'emploi pour l'économie française. Les projections de l'étude sur la propulsion par le vent réalisée en 2016 par le bureau CE Delft pour le compte de la commission européenne estiment que 15 000 à 18 000 emplois pourraient être créés d'ici 2030. En France, Wind Ship estime qu'au moins 350 emplois relèvent déjà de ce domaine. D'ici 2030, ce chiffre pourrait être multiplié par 10.

Dessiner un monde maritime attractif

Opérer ces navires, les maintenir et organiser les lignes maritimes de demain, dans le cadre d'une gestion plus agile mais aussi plus complexe, nécessite un transfert de compétences issues de l'aéronautique, du numérique vers le monde maritime, mais aussi une réappropriation des modalités de navigation par les gestionnaires de flotte et les marins. Loin de repousser, ces nouvelles modalités représentent à la fois une piste sérieuse de sauvegarde d'emplois mais aussi une opportunité pour attirer et retenir les talents, comme en témoignent les nombreuses candidatures reçues par les acteurs de la propulsion par le vent.

Les atouts

Des acteurs économiques pionniers

La France dispose déjà de pionniers qui travaillent depuis plusieurs années à ces projets, et d'un écosystème de compétences historiques qui trouve matière à se réinventer. Des entreprises, majoritairement des



La propulsion des navires par le vent est pour le Pôle Mer Bretagne Atlantique une formidable source d'innovations aussi bien technologique que d'usage. Elle met en œuvre des technologies aussi diverses que les matériaux composites, la mécanique des fluides, les communications satellites, les mesures océanographiques, l'électronique embarquée, l'automatisation des systèmes, ...

Au-delà de ces innovations, la propulsion par le vent impulse également l'évolution des dessertes portuaires, la création de nouvelles routes maritimes et le transport de marchandises différentes. Les transferts de technologies et de compétences entre la course au large ou l'aéronautique et l'ensemble de la filière maritime sont une véritable opportunité pour le développement d'un transport maritime plus propre et décarboné grâce à l'utilisation de l'énergie du vent, et créateur d'emplois et de valeur.

Le Pôle Mer Bretagne Atlantique en animant un écosystème dynamique et innovant est au service de la transition écologique à laquelle contribue la propulsion par le vent.

Patrick Poupon

Directeur du Pôle Mer Bretagne Atlantique

startups ou des PME mais aussi des acteurs majeurs, se cotoient dans le développement des technologies, représentant plus de 180 emplois directs : ADD Technologies, Airseas, AYRO, Beyond The Sea, Chantiers de l'Atlantique, CRAIN, CWS, Maloric, WISAMO.

Déjà, des compagnies maritimes arment des navires propulsés par le vent et destinés à la haute mer : Alizés (Zéphyr & Borée et Jifmar), Grain de Sail, Neoline, Ponant et TOWT, ainsi que de nouveaux arrivants qui dessinent leur projet, comme Eco Trans Ocean, EcoBreeze, ...

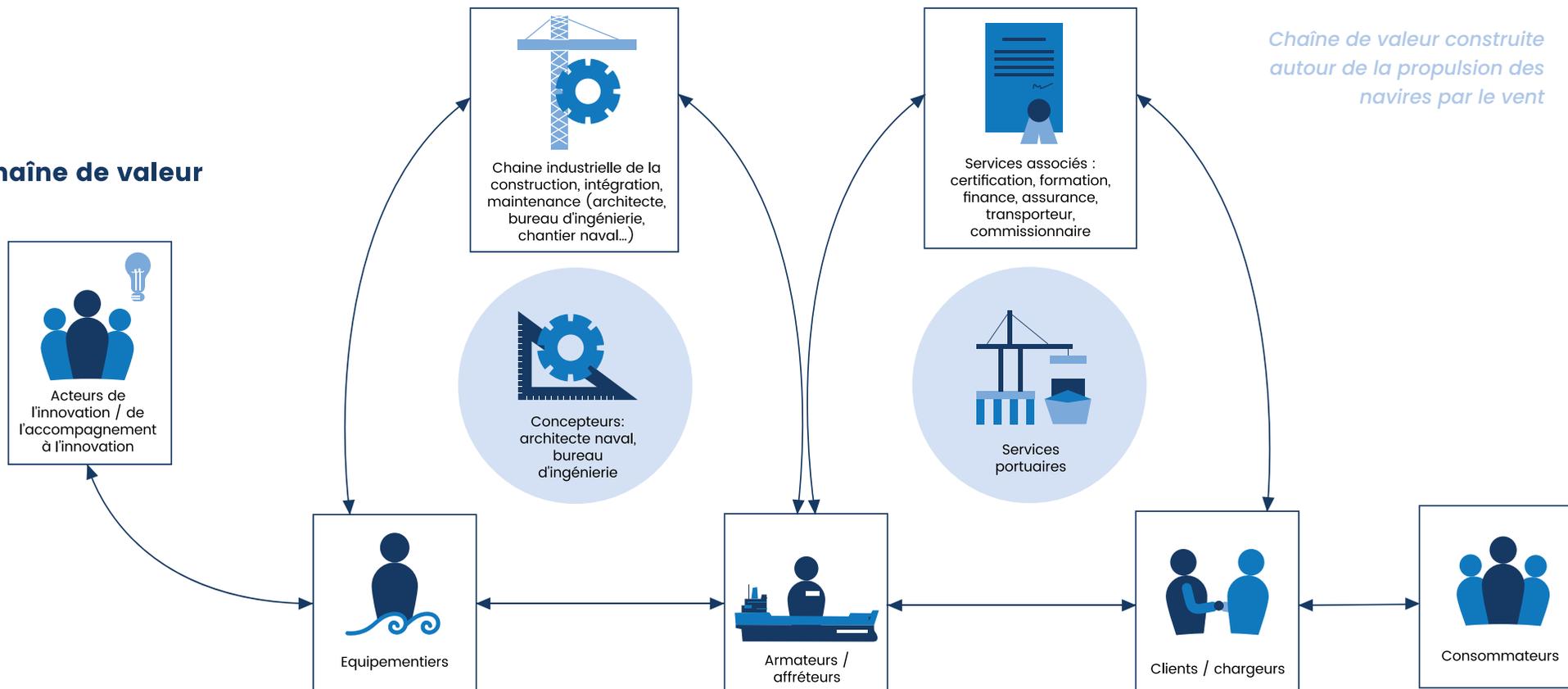
Parallèlement, d'autres arment ou visent à armer des navires pour des trajets côtiers ou de la navigation de travail, en métropole et outre-mer : Avel Marine, Iliens, Seafret Caraïbes, Skravik, Eol'Lien, Bourlingue et Pacotille, Blue Schooner Company, les Amarres d'Amour, Projet Glaz.

Une grande partie de ces acteurs est déjà fédérée au sein de l'association Wind Ship, et de son réseau international, IWSA.

Une chaîne de valeur de plus en plus complète

Une chaîne de valeur de plus en plus complète se construit à l'échelle de la France, pour produire et exporter les équipements mais aussi pour ouvrir de nouvelles lignes.

Chaîne de valeur



*Chaîne de valeur construite
autour de la propulsion des
navires par le vent*



« La décarbonation de leurs flux logistiques est au cœur de la réflexion de très nombreux chargeurs (entreprises industrielles et commerciales, importatrices ou exportatrices) et fait l'objet de beaucoup de leurs actions. Déjà très engagée sur la baisse des émissions de CO2 des transports terrestres et short sea, à travers le dispositif FRET21 qu'elle porte avec l'ADEME, leur association professionnelle, l'Association des Utilisateurs de Transport de Fret, appuie l'émergence en France d'une filière permettant le transport transocéanique de conteneurs par des navires équipés de systèmes de propulsion en majorité vélique permettant de réduire l'empreinte carbone attachées aux marchandises ainsi transportées. En particulier, l'AUTF co-pilote un projet visant à mutualiser les besoins de diverses entreprises pour créer une demande de transport sur des routes transatlantiques entre l'Europe et les Etats-Unis suffisante pour susciter la création d'un service régulier de cargos à voile sur ces lignes. D'autres initiatives pourraient suivre. Nous espérons, que l'année 2022, voit se concrétiser ce projet et s'en amorcer d'autres. »

*Denis Choumert
Président de l'Association des
Utilisateurs du Transport de Fret*

La mobilisation des bureaux d'ingénierie, des architectes navals, des sociétés de sous-traitance industrielle et des chantiers navals est forte: ainsi, le projet AGORA porté par Neopolia, un réseau d'entreprises industrielles notamment dans le secteur maritime, vise à créer une capacité industrielle unique en France capable de proposer des moyens dédiés notamment à la construction de navires véliques. Ocea, Mecasoud, Piriou, Chantiers de l'Atlantique se positionnent sur ce marché. Mais c'est aussi toute une chaîne de sous-traitance industrielle, des moyens de financement, et des chargeurs qui se mobilisent aujourd'hui en France. La récente initiative d'une coalition de grands chargeurs appuyés par France Supply Chain et l'Association des utilisateurs de fret (AUTF) qui souhaite commander une dizaine de navires propulsés par le vent dès 2025 le prouve.

Des territoires impliqués

Les pionniers de la propulsion par le vent tendent à se concentrer sur des territoires qui sont volontaires et veulent explorer avec eux ces nouvelles pratiques, guidées par des valeurs sociétales et environnementales renforcées. Ces entreprises naissent et s'implantent également au cœur d'écosystèmes industriels qui apportent des savoir-faire essentiels à la filière, tels que l'aéronautique, la construction navale, le nautisme et le numérique. On trouve donc une concentration importante d'acteurs sur la façade Atlantique-Manche, de la Nouvelle Aquitaine à la Normandie, notamment en Bretagne et Pays de la Loire. La région PACA, façade maritime méditerranéenne française, voit son écosystème s'étoffer. Enfin, l'Île-de-France concentre de grands donneurs d'ordre et des centres de recherche.

Les régions mais aussi les métropoles jouent un rôle clé dans le soutien et l'animation de ces écosystèmes.

Nantes Métropole fait émerger un pôle dédié aux activités nautiques et maritimes pour accueillir à nouveau une histoire maritime. L'écosystème nantais a la capacité à faire émerger et dé-risquer d'un point de vue de la technologie, du marché ou du financement, des projets de propulsion par le vent, de l'idée jusqu'aux essais de maquettes grâce à la présence des acteurs de l'accompagnement à l'innovation et de l'innovation, de moyens d'essais physiques et d'entreprises pertinentes.

Saint-Nazaire Agglomération (CARENE) souhaite développer un centre industriel lié aux nouvelles propulsions. En effet, les infrastructures et entreprises nécessaires pour mener à bien des essais physiques à taille réelle, à terre et en mer, ainsi que pour réaliser l'intégration des nouvelles propulsions sur des navires depuis la conception jusqu'à l'exécution des chantiers sont notamment présentes dans l'écosystème du port de Saint Nazaire et des Chantiers de l'Atlantique.

La région Bretagne vient d'évaluer la capacité de son tissu industriel à se positionner sur la filière de la propulsion des navires par le vent. Ainsi, 156 entreprises issues du naval, du nautisme et de la voile de compétition s'intéressent à ce marché, et 55% d'entre elles l'estiment prioritaire pour leur développement. Le poids économique de la filière est déjà estimé en Bretagne à 28 millions d'euros et 155 emplois. Au-delà de sa filière industrielle et de ses moyens de recherche, le territoire breton a le potentiel pour devenir un banc de test à taille réelle de technologies, d'usages et de business models. La Bretagne compte plusieurs ports de taille intermédiaire, de nombreuses entreprises exportatrices, un besoin fort et croissant de transport de passagers vers ses îles. Autant de besoins logistiques locaux qu'il faut décarboner. La région des Pays-de-la-Loire investit dans le projet d'une nouvelle ligne maritime décarbonée en soutenant financièrement le projet Neoline, et facilite l'implantation de l'usine d'Airseas, tandis que le port du Havre met en place les conditions d'accueil du projet de TOWT et que la Chambre de commerce et d'industrie de Caen Normandie, concessionnaire du Port

de Caen-Ouistreham, facilite l'implantation de l'usine d'AYRO sur ce port de commerce.

Ces soutiens, ces écosystèmes, les expérimentations dont la liste n'est pas exhaustive, sont extrêmement importants pour permettre le développement d'une filière française de la propulsion par le vent.

Un financement complexe des navires

Le financement des navires est un enjeu non spécifique à la propulsion par le vent, mais il se complexifie pour les premiers de série.

Un monde en profonde mutation

Le monde du financement dans le shipping est en profonde mutation. La crise de 2008 a provoqué un effondrement des taux de fret et une surcapacité de la flotte marchande à l'échelle mondiale. Depuis, les banques du shipping sont tiraillées entre les règles de prudence imposées par les accords de Bâle – soit une contribution plafonnée et un niveau de 40% de fonds propres requis pour l'armateur – les principes de décarbonation tels que les principes Poséidon (détail : [36](#)) et la concurrence des banques asiatiques.

La construction des navires de marine marchande mobilise des capitaux dont l'ordre de grandeur varie évidemment en fonction de l'échelle des navires considérés. Ainsi, un voilier comme Grain de Sail (25 m, 50 t d'emport) a mobilisé 2 millions d'euros. Le prochain navire de l'entreprise (50 m et 350 t) restera sous la barre des 10 millions d'euros. Les navires Canopée ou Neoline (>120 m, 5000 t) représentent plutôt des investissements de l'ordre de 40 à 50 millions d'euros. Si l'estimation de

la valeur des coques ne pose pas de problème aux financeurs, la valeur représentée par les gréements de propulsion par le vent est difficile à faire reconnaître, car elle est à réinventer.

Des opportunités

Volatilité du coût des carburants

Pourtant, la valeur de ce gréement est importante car il permet, lors de l'opération du navire, de s'affranchir en partie de la volatilité des coûts des carburants puisque son utilisation diminue le recours à ceux-ci en réduisant leur consommation, ce qui stabilise in fine le modèle économique de l'exploitation d'une ligne maritime.

Dans tous les cas, la validation, grâce à un retour d'expérience, des performances et de la solidité des systèmes de propulsion par le vent constitue un point de passage obligé qui devrait permettre aux financeurs de disposer des assurances nécessaires pour évaluer la valeur des gréements et valider la solidité des modèles économiques d'exploitation des navires.

Renforcement du prix du carbone dans les eaux européennes

L'entrée en vigueur entre 2023 et 2026 d'une révision de la réglementation européenne obligera les navires de jauge brute supérieur à 5000 à couvrir 100% de leurs émissions de CO2 dans les eaux européennes. Ainsi, toute émission évitée sera valorisée financièrement dans le cadre du marché d'échange des quotas d'émissions. La tonne de CO2 atteint 65 € en octobre 2021.

Ainsi, prenons l'exemple d'un vraquier d'une dizaine d'années (détail : [37](#)), de 37 000 tpl, qui émet 6 000 tonnes de CO2 dans les voyages intra-européens et à quai. Celui-ci devra régler 300 000 € chaque année



Il y a un siècle, les navires sont passés de la voile à la vapeur. Aujourd'hui, pour réduire l'impact climatique relatif à l'exploitation des navires, le vent s'invite à nouveau dans les systèmes propulsifs des navires. Disponible partout dans le monde, gratuit et sans émission de GES, le vent est une énergie à saisir ! Les technologies sont d'ores et déjà disponibles, de nombreux navires peuvent en profiter selon leurs secteurs. Certains de nos membres ont déjà choisi cette solution (Neoline, Jifmar, Zéphyr et Borée et TOWT) et les autres suivent de très près le développement des différentes technologies. La France peut se féliciter d'un bassin entreprenant en la matière, mais doit conserver cette dynamique dans la filière toute entière. Armateurs de France soutient, aux côtés de l'association Wind Ship, le déploiement de la propulsion par le vent. A cette fin, il est impératif que des outils incitatifs concrets soient mis en œuvre par l'État.

*Jean-Emmanuel Sauvé,
Président d'Armateurs de France*

pour couvrir ses émissions (moins d'éventuelles allocations gratuites et modulo l'évolution du coût de la tonne de CO₂). Pour un roulier plus récent de 22 500 tpl, les 2 000 t de CO₂ émises par an équivaldront à une facture annuelle de 100 000 €.

Surcoût du prototypage

Les navires équipés de technologies innovantes de propulsion par le vent, que ce soit en retrofit ou lors d'une construction neuve, doivent intégrer un surcoût lié au fait que les systèmes de propulsion par le vent sont encore des prototypes. Pour cette raison, il n'est pas encore possible de publier des retours sur investissement (ROI) ou des coûts stabilisés à partir de ces premières opérations.

Les développeurs de technologies de propulsion par le vent traversent ce qu'il est coutume d'appeler la vallée de la mort (source : [38](#)), c'est-à-dire le moment où les premières étapes de développement sont concluantes mais les besoins en trésorerie sont importants pour commencer à installer les technologies sur des démonstrateurs à l'échelle avant de lancer une production industrielle.

Cela signifie aussi que d'une part, les armateurs pionniers vont devoir assumer un surcoût et prendre le risque d'être les premiers testeurs, et que d'autre part, le produit installé aura sans doute une moindre valorisation à la revente car sa production industrielle démarrera par la suite avec des produits plus aboutis et mis en vente à un coût inférieur.

Le soutien de l'État

Ce type d'obstacle n'est pas sans rappeler les obstacles rencontrés au développement des énergies renouvelables. Celles-ci ont bénéficié

d'un soutien de l'État soit en amont dans le domaine de la recherche et développement, soit en phase d'industrialisation en soutien à la demande et au déploiement commercial (par exemple par le biais de tarifs d'achat et complément de rémunération, d'appels d'offres ou de dispositifs fiscaux). Ce soutien a permis de réduire le coût actualisé de l'énergie produite - une tendance qui perdure même après l'arrêt du soutien public grâce à la diminution des coûts en capital et en exploitation.

On peut signaler ici le rôle très actif de l'ADEME pour appuyer le volet R&D des technologies de propulsion par le vent qui représente presque 7% des financements des programmes d'investissement d'avenir, soit 12,5 M€ (source : [39](#)). Mais les banques, investisseurs et fonds verts sont encore très en retrait lorsqu'il s'agit de passer au financement de l'équipement des navires. La phase d'audit des projets par ces acteurs est encore relativement ardue par manque de retour d'expérience.

Enfin de nouvelles propositions émergent :

- Des dispositifs fiscaux incitatifs sont en cours d'amélioration dans le cadre du Fontenoy du Maritime. Le suramortissement des systèmes de propulsion par le vent en fait partie. Il doit être amélioré pour être réellement applicable et efficace, et retravaillé pour ce qui relève de la catégorisation « propulsion auxiliaire », qui, en raison de la formule utilisée actuellement, pénalise la majorité des projets de propulsion par le vent.
- Des modèles de leasing sont étudiés, afin de faire porter les coûts d'équipement non sur des dépenses d'investissement (CAPEX) mais sur des dépenses d'exploitation (OPEX). En effet, si un navire est amené à être désarmé, les éléments du système propulsion par le vent peuvent être démontés et réinstallés sur une autre unité.

Pistes pour structurer et accélérer le développement de la propulsion par le vent

Pour que le transport maritime réalise rapidement sa transition vers des pratiques plus propres et que la France occupe réellement une place importante dans ce domaine, les deux objectifs doivent être poursuivis avec un regain d'intensité, et plusieurs actions doivent être engagées. Celles-ci nécessitent la mobilisation des acteurs économiques: ceux qui utilisent le transport maritime, ceux qui font partie du secteur maritime et ceux qui font leur entrée dans le secteur maritime. Elles nécessitent aussi l'implication forte de l'État français et des collectivités territoriales.

1 Prendre acte de la disponibilité immédiate des technologies

La propulsion par le vent doit être accompagnée de manière spécifique car elle ne rencontre pas les mêmes contraintes que les solutions alternatives qui ne seront disponibles qu'après 2030.

2 Convaincre les usagers de la pertinence des solutions

- Valider les performances des navires en adoptant un cadre harmonisé d'évaluation et en affectant des moyens au suivi des premiers projets.
- Donner de la visibilité à l'offre en communiquant auprès des armateurs et des chargeurs.

3 Accélérer le retour sur investissement des projets au stade de prototype

Proposer des aides au financement adaptées pour l'armateur, le propriétaire ou le financeur du navire pour cette période de transition, telles que :

- un dispositif de subvention comme celui proposé par l'Allemagne, qui prend en charge jusqu'à 55 % du coût d'investissement et d'installation d'un système de propulsion par le vent (détail :⁴⁰);
- une amélioration du dispositif de suramortissement vert des navires pour le rendre applicable et efficace, et y inclure la propulsion auxiliaire par le vent de manière réellement incitative.

Valoriser financièrement les émissions de GES évitées

- utiliser les programmes des certificats d'économie d'énergie afin de financer des études, de la sensibilisation et de la communication et faciliter la mise en œuvre d'opérations spécifiques liées à des projets de propulsion par le vent
- affirmer une position française claire sur la nécessité d'instaurer un coût du carbone dans les discussions européennes et internationales.

4 Soutenir le secteur par des commandes ou des réglementations

- Introduire des obligations ou permettre des variantes de propulsion par le vent ou d'hybridation dans les appels d'offres de marchés publics pour la flotte d'Etat, les délégations de service public, etc.
- Faciliter l'installation industrielle des équipementiers.
- Proposer des conditions de pavillon incitatives pour tout navire propulsé par le vent.
- Multiplier les propositions de lignes décarbonées par le vent au départ des ports français métropolitains et d'outre-mer afin que les premières lignes commerciales aient un effet d'entraînement.
- Encourager la création de nouvelles dessertes de proximité et la mise en réseau des ports volontaires.

5 Fédérer et structurer la filière qui émerge

Soutenir les initiatives qui regroupent et fédèrent les acteurs aux échelles régionales, nationales et internationales

Annexes

Présentation des membres de Wind Ship

L'association accueille régulièrement
de nouveaux membres.
La liste à jour est disponible sur le site
www.wind-ship.fr



ADD Technologies pionnier dans la conception de voile-ailes gonflables est un bureau d'étude basé à Lorient qui travaille en étroite collaboration avec les chantiers navals et les armateurs. L'objectif est de fournir un système de voile-aile de propulsion aux navires de servitude et à la flotte existante du transport maritime. Les composants de son système sont issus de technologies éprouvées et sont fabriqués par un réseau de partenaires ; ils sont ensuite assemblés dans ses ateliers.

<https://add-modules.com/fr/>



ACCWing est un concept d'aile épaisse souple breveté. La start-up, basée à Châteauneuf-les-Martigues, a pour but de commercialiser cette solution vélique innovante pour équiper des bateaux de plaisance, des yachts et des navires de transport maritime. Le contrôle de la cambrure de l'aile ACCWING est semi automatisé, un bateau démonstrateur navigue depuis 2020. L'automatisation complète est maintenant à l'étude avec Sirehna, filiale de Naval Group. ACCWing travaille aujourd'hui sur un projet de clipper de 75m de long équipé de 4 ailes, pour du transport de fret et passagers. D'autres plus petits projets sont également à l'étude.

<https://www.accwingsail.com/>



Airseas est une société créée en 2016 par des ingénieurs du groupe Airbus qui ont souhaité transférer l'expertise aéronautique au secteur maritime afin de contribuer à sa décarbonation. Symbole des synergies entre le secteur aéronautique et le secteur maritime, Airseas commercialise une aile de kite de 1000 mètres carrés (le "Seawing") capable de tracter les plus gros navires qui génèrent le plus d'émissions dans le monde. Le Seawing est un équipement intégré simple, automatique et sûr. Il permet d'économiser en moyenne 20% de fuel et d'émissions associées.

<http://www.airseas.com/>



AYRO est une société française qui conçoit et fabrique les Oceanwings® : des ailes de propulsion éolienne brevetées, automatisées et affalables. Ce système de propulsion éolienne peut être installé sur les navires de commerce et les yachts, et permet ainsi de diminuer les émissions de gaz à effet de serre du transport maritime. Après un démonstrateur industriel à bord d'Energy Observer et deux années de navigation, les quatre premières ailes Oceanwings® 363 sont en cours de fabrication et seront livrées sur Canopée fin 2022. Canopée est un navire roulier de 121 mètres de long imaginé par le cabinet d'architecture navale VPLP Shipping et en construction au chantier Neptune Marine. Il sera opéré par la société Alizée, une joint-venture entre les entreprises Jifmar et Zephyr & Borée, et transportera les composants du lanceur Ariane 6 pour ArianeGroup entre l'Europe et la Guyane Française.

<https://ayro.fr/>

beyond the sea®
by Yves Parlier

Beyond the Sea®, créé en 2014 par Yves PARLIER, est une entreprise résolument innovante dans le plus pur respect de l'environnement. Le principe est simple. Beyond the Sea® propose des kites de toutes tailles, capables de prendre en charge tout ou partie de l'énergie nécessaire à la traction du navire, en fonction de la zone de navigation, des performances et caractéristiques du bateau et des objectifs des marins. Le kite, relié à un point fixe du navire, sera mis en mouvement ou non en fonction de la force et la direction de la traction souhaitée, le tout en parfaite sécurité. Le contrôle du kite peut être assuré automatiquement ou manuellement.

<https://beyond-the-sea.com/yves-parlier/>



Bright Future Marine Solutions est une société française de support en ingénierie et en T&I établie en 2017 à Lorient, et aujourd'hui présente à l'international. Elle est spécialisée dans le maritime et l'énergie offshore renouvelable, avec une expertise notamment sur :

- l'hybridation et l'électrification des navires de charge et bateaux de plaisance
- l'implantation en ingénierie de solutions innovantes pour la non pollution par les navires.

BFMS participe entre autres aux projets nécessitant une expertise en matériaux composites innovants (lin, résine bio-sourcée), et en propulsion alternative (turbo-voile, voile rigide).

<http://www.brightfuturemarine.com/>



CHANTIERS DE L'ATLANTIQUE est un chantier naval spécialisé dans les navires de croisière et militaires. Dans le cadre de l'amélioration de l'empreinte carbone des navires de croisière, CHANTIERS DE L'ATLANTIQUE a développé une voile destinée aux grands navires à propulsion vélique – SOLID SAIL – et un gréement à balestron – AEOL DRIVE – qui peut se basculer pour diminuer le tirant d'air et passer sous les ponts lorsque nécessaire. Avec ces produits AEOL DRIVE et SOLID SAIL, CHANTIERS DE L'ATLANTIQUE veut prendre une part significative des solutions de propulsion vélique dans les années à venir sur les segments croisière, navires de fret et super yachts.

<https://chantiers-atlantique.com/>



Le CRAIN (Centre de Recherche pour l'Architecture et l'Industrie Nautiques) est un bureau d'étude situé à La Rochelle. Impliqué dans le nautisme et la voile de compétition depuis la fin des années 80 avec de nombreuses participations à l'America's Cup, le CRAIN s'est tourné vers la transition énergétique en mettant à profit ses compétences en architecture navale et en aérodynamique. Le CRAIN a développé des modèles de performance pour différentes solutions de propulsion par le vent, des outils de prédiction de performance du navire en propulsion hybride et un logiciel de routage. Plus récemment, le CRAIN a développé une solution optimisée de propulseur basé sur le concept de l'aile aspirée avec des essais en soufflerie et un prototype de 7,50 m testé à terre dans un environnement représentatif.

<http://site.craintechnologies.com/>



CWS propose un système propulsif vélique innovant pour le secteur maritime. La voile aile CWS est rigide, asymétrique, inversible et affalable. Elle réduit la consommation de carburant du navire en aidant le moteur principal et peut être déployée à la fois sur la flotte existante et sur les constructions neuves. Ses performances, notamment sa finesse, assurent une propulsion régulière même sur des navires rapides et des effets de dérive limités; le fonctionnement est automatique et la maintenance minimale. CWS fournit également des analyses d'intégration, d'économies de carburant et d'impacts EEDI/EEXI selon les meilleures pratiques.

<https://computedwingsail.com/>



Deeptech créée à Nantes en 2015, D-ICE a l'ambition de réduire l'empreinte carbone du shipping, d'améliorer la performance en mer et de produire des énergies propres en accompagnant et proposant ses solutions aux acteurs des secteurs:

- Logiciels scientifiques avancés pour l'ingénierie navale
 - Modélisation, évaluation des performances des plateformes navales
 - Systèmes embarqués de navigation et de pilotage.
- Expertises : modélisation, simulation, hydrodynamique, mathématiques appliquées, robotique et contrôle, et ingénierie logicielle et système.

<https://dice-engineering.com/>



Eco Trans Océan est un armement malouin créé en 2021 dont le but est de relier les territoires français avec un cargo à propulsion vélique innovant. Le voilier cargo est un outil efficace du transport maritime de demain qui permet de réduire et de maîtriser la pression sur le milieu naturel. Eco Trans Océan développe des lignes commerciales, responsables, proches des hommes et des territoires. A l'horizon 2025 un premier navire concrétisera les objectifs d'Eco Trans Océan.

<http://www.ecotransocean.com/>



François LUCAS est l'architecte naval du cargo à voile SEAFRET 35, destiné au fret inter-îles dans l'Arc Antillais, pour le compte de l'armateur Seafret Caraïbes. Ce navire de 35m et d'une capacité de fret de 100 tonnes bénéficiera des alizés, vents d'Est réguliers tout au long de l'année, ce qui lui assure d'être toujours vent de travers à l'aller comme au retour. Il est donc prévu une réduction de consommation de fuel supérieure à 50% par rapport à un caboteur classique en propulsion thermique. Ce concept du caboteur à voile au tirant d'eau réduit pourra être décliné pour répondre aux demandes d'armateurs dans le monde ou le long des côtes européennes pour assurer les échanges locaux.

<https://www.fr-lucas.com/>



L'aventure **Grain de Sail** est née en 2010, les pieds dans l'eau à Morlaix, avec cette idée d'aller chercher du café et du chocolat à l'autre bout du monde en limitant au maximum l'impact carbone grâce à un moyen de transport unique : le voilier cargo. Olivier et Jacques Barreau, frères jumeaux originaires de St Briec et experts en énergies renouvelables, sont les fondateurs et dirigeants de la société. En 2020, le Grain de Sail, premier voilier cargo moderne normé marine marchande internationale, a effectué sa première boucle transatlantique (St Malo -> New York -> République Dominicaine -> St Nazaire). Ce navire, type goélette de 24 m et 50 t d'emport, effectue deux boucles transatlantiques par an de 3 mois chacune mais n'est qu'un début puisque Grain de Sail affrètera un second voilier cargo (de 50 m et 350 t d'emport) à partir de 2023.

<https://graindesail.com/>



MAXSEA est un éditeur de logiciels de navigation maritime, acteur majeur sur les solutions embarquées dans le domaine de la pêche professionnelle et de la plaisance. Créé en 1984, Maxsea a développé le premier logiciel de navigation maritime pour PCs embarqués, et propose aujourd'hui une large gamme de produits. Après 30 années de développement et d'innovation, Maxsea International commercialise ses solutions sous la marque TIMEZERO : une gamme de produits répondant à tous les besoins de navigation électronique, vendus dans 25 pays, sur 5 continents, disponibles en 13 langues.

MAXSEA propose une nouvelle solution d'écoroutage permettant d'optimiser les performances de la navigation propulsée par le vent. Celle-ci est déjà embarquée pour des tests en mer sur un navire marchand.

<https://mytimezero.com>



Créée il y a 15 ans par le navigateur François Gabart, **MerConcept** est née de la volonté de développer une écurie de course au large à la pointe de l'innovation et de la performance. Devenue entreprise à mission, MerConcept est engagée pour une course au large innovante, performante et durable. Cette dernière accueille des projets ambitieux, porteurs de sens, dont les innovations marquantes permettent des transferts technologiques pour une mobilité maritime plus durable.

<https://merconcept.com/>



CT Mer Forte est un bureau d'études, d'ingénierie et d'architecture navale créé en 2009 par Michel Desjoyeaux et Denis Juhel. Issue de la course au large et naturellement tournée vers l'innovation, l'équipe de CT Mer Forte, adossée depuis 2020 au groupe international CT INGENIERIE, met, depuis sa création, son expertise au profit des projets de propulsion vélique des navires

<https://www.merforte.com/>



WISAMO -Wing Sail Mobility- est une initiative d'incubation du Groupe Michelin. Son ambition est de contribuer à la décarbonation du transport maritime en améliorant l'empreinte environnementale des navires marchands, réduisant leur consommation de carburant et donc leurs émissions de GES. La solution WISAMO est une grande aile gonflable, rétractable et automatisée utilisant la propulsion par le vent, énergie gratuite et universelle, adaptée à tous types de bateaux.

<http://www.linkedin.com/showcase/wisamo/>



Neoline développe une ligne de transport maritime décarboné reliant Saint-Nazaire à la côte est américaine, et Saint-Pierre-et-Miquelon. Cette ligne sera opérée à partir de 2024 avec un puis deux navires rouliers à propulsion principale vélique, de 136m de long pour 5300 tonnes de capacité, économisant plus de 80% du carburant. Elle a vocation à démontrer la possibilité, en s'appuyant sur le vent, d'un service logistique sobre, efficient et industriel. Le projet a su convaincre de grandes entreprises françaises, telles que Groupe Renault, Groupe Beneteau, Manitou Group, Michelin, JAS Hennessy & Co, Clarins et Longchamp.

<https://www.neoline.eu/>



PROPELWIND propose au transport maritime une solution décarbonée (sous forme de licence) utilisant le vent en propulsion principale. Le focus initial porte sur des navires monocoques, adaptés à différentes cargaisons de faible densité et rapides. Les premiers navires sont de petite taille (2 000 tpl) à livrer en 2025. L'objectif est d'augmenter la taille progressivement (« scale-up ») vers 25 000 tpl en 2040. La configuration trimaran est développée en parallèle pour des marchés de niche, parfaitement « zéro-émission » et plus performant.

<https://propelwind.com/>



REEL est une entreprise indépendante créée en 1946 et compte près de 2 500 salariés. REEL développe, construit, installe et maintient des systèmes complexes de manutention et assure leur intégration au process de chaque client. L'entreprise intervient dans les domaines de l'aéronautique, la défense, l'énergie, la métallurgie, l'offshore, l'industrie et compte des clients dans le monde entier. Depuis son établissement sur le port Atlantique de La Rochelle, REEL participe depuis plusieurs années à des développements avec d'autres membres de la filière émergente de la propulsion par le vent.

Aujourd'hui, en partenariat avec le CRAIN et la région Nouvelle Aquitaine, REEL s'engage pour la conception, la réalisation et la commercialisation d'un système d'aile aspirée pour le transport maritime.

<http://www.reelinternational.com>

SYROCO **Syroco** est un laboratoire scientifique et technique qui génère de l'innovation au service de la transition énergétique, à travers la réalisation d'exploits pionniers. Basée à Marseille, la startup commercialise notamment Syroco EfficientShip, une plateforme logicielle basée sur un jumeau numérique d'un navire et de ses systèmes de propulsion.

Utilisant des fondations scientifiques développées autour des travaux de recherche sur la vitesse et l'exploitation de la puissance du vent, Syroco EfficientShip permet la prise de décision en matière d'efficacité énergétique, à la fois pendant la conception et durant l'exploitation d'un navire ou d'une flotte.

<https://syro.co/fr/>



Après avoir affrété pendant 10 ans des vieux gréements et avoir transporté plus de 1 000 tonnes de marchandises à la voile (thé, café, cacao, rhum...), **TOWT** lance la construction d'une flotte de quatre voiliers-cargos modernes qui transporteront de manière décarbonée (à 90 % en moyenne) des marchandises pour le compte de grandes marques (Cémoi, Belco, Martell Mumm Perrier-Jouët,...). D'une longueur de 80 mètres, ces voiliers-cargos ont une capacité de 1100 tonnes et desserviront l'Amérique du Nord et du Sud, l'Afrique et l'Asie, et permettront d'économiser jusqu'à 2400 tonnes de CO2 et transporter 10 000 tonnes de marchandises par navire par an.

<https://www.towt.eu/>



VPLP Design est une agence d'architecture navale fondée en 1983, implantée à Vannes, Nantes et Paris. Son équipe d'architectes, d'ingénieurs et de designers travaille sur des projets dans le monde entier. VPLP est une référence pour les designs de navire à voile, que ce soit en course, en croisière ou en grande plaisance. L'agence est également à la pointe de l'innovation dans le transport maritime décarboné, avec un savoir-faire unique dans la conception de navires hybrides à assistance vélique. VPLP réalise notamment des études d'ingénierie dans les domaines de la modélisation et simulation hydrodynamique, la prédiction de performance, la conception et l'ingénierie composite.

<https://www.vplp.fr/>



Zéphyr & Borée est une compagnie maritime de transport à la voile. En partenariat avec Jifmar, elle fait actuellement construire et mettra en service le navire Canopée en 2023. D'une longueur de 121 mètres, Canopée est le premier cargo à voile moderne. Zéphyr & Borée vise la décarbonation du transport maritime et se diversifie dans le développement de porte-conteneurs et de navires rouliers pour tendre vers un transport maritime zéro-émission.

<https://zephyretboree.com/>

Annexes techniques

La flotte marchande aujourd'hui

En 2020, la flotte mondiale de commerce comprenait 52 961 navires de jauge brute supérieure à 1000, qui représentent la quasi-totalité de la capacité mondiale (2,047 milliards de tonnes de port en lourd).

La flotte mondiale comprend 98 140 navires de jauge brute supérieure à 100, soit une capacité de 2,061 milliards de tonnes de port en lourd, dont un peu plus de 45 000 sont de petite taille et représentent moins de 1% de la capacité mondiale.

La capacité de cette flotte augmente chaque année (+ 4,1% en 2019).

Cette flotte peut être divisée en différents segments* :

- Les plus importants sont les porte-conteneurs, les vraquiers, les pétroliers, les cargos polyvalents.
- Certains navires sont plus spécialisés : chimiquier, gazier, roulier, transport de véhicules, vrac réfrigéré.
- D'autres transportent les passagers : ferries, navires de croisière.
- Ces navires sont aussi répartis en catégories de tailles.



Pétrolier	Handysize	Panamax	Very Large Crude Carrier (VLCC)
Capacité	Jusqu'à 35 000 tpl	35 000 à 80 000 tpl	>80 000 tpl



Vraquier	Handysize	Panamax	Capesize
Capacité	Jusqu'à 35 000 tpl	35 000 à 80 000 tpl	>80 000 tpl



Porte-conteneur	Feeder	Panamax	Ultra Large Container Ship (ULCS)
Capacité	Jusqu'à 2 000 EVP	2 000 à 5 000 EVP	>15 000 EVP

* Cette flotte appartient pour plus de 50% en nombre et 70% en tonnage à des propriétaires en Grèce, au Japon, en Chine, à Singapour, à Hong-Kong, en Allemagne, en République de Corée, en Norvège, aux Bermudes et aux États-Unis. La flotte sous propriété française représente un peu plus de 400 navires soit 0,65% de la flotte mondiale. 35 000 navires représentant 71% de la capacité mondiale sont enregistrés sous les pavillons de Panama, Libéria, Îles Marshall, Hong-Kong, Singapour, Malte, Chine, Bahamas, Grèce et Japon.

Nota bene

La jauge brute des navires est une mesure du volume des espaces fermés de ceux-ci à l'aide d'une formule de calcul universelle introduisant un coefficient logarithmique. Cette jauge est donc exprimée dans le système de mesure universel (Universal Measurement System) mais n'a pas d'unité.

Le port en lourd (tonnes de port en lourd, Tpl) est le poids maximal que le navire peut transporter, et traduit la capacité de chargement de celui-ci.

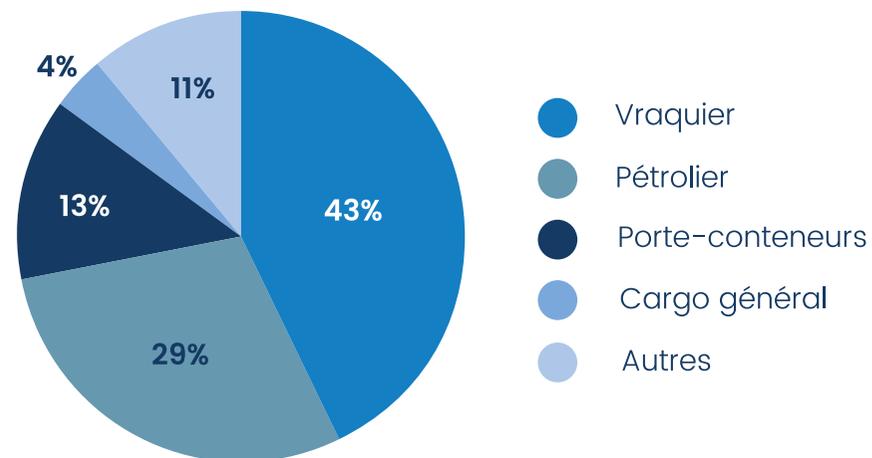
La capacité des porte-conteneurs est désignée par le nombre de conteneurs équivalent 20 pieds (EVP) qu'ils peuvent transporter.

En complément, il existe :

- Des navires liés aux activités offshore
- Des navires de service, en partie mobilisés par le milieu portuaire: pilotine, drague, remorqueur, sablier, baliseur, câblé, support de travaux maritime.
- Des navires école, des navires de recherche océanographique.

Les porte-conteneurs, vraquiers et pétroliers représentent, au total, plus de 80% des émissions mondiales de CO₂ et polluants atmosphériques* en raison de l'importance de leur flotte qui représente 85% des capacités mondiales. Si l'on considère les émissions par type de navire, les méthaniers et les navires de croisière sont ceux qui émettent le plus de CO₂, suivis par les porte-conteneurs, les transporteurs de véhicules, les ferries et les rouliers.

Répartition de la flotte mondiale (capacité en tpl, 2019-2020)



L'âge moyen de la flotte mondiale est de 21 ans si l'on raisonne en nombre de navires, mais de 10 ans si l'on raisonne en capacité de transport.

En effet, les navires construits ces quatre dernières années sont beaucoup plus grands qu'il y a 20 ans**. Aussi disposons-nous aujourd'hui d'une part d'une flotte nombreuse, de plus petite taille et plus âgée et d'autre part, d'une flotte plus jeune et de plus grande taille.

Si l'on raisonne en capacité, les vraquiers constituent la flotte la plus jeune, suivie par les porte-conteneurs et les pétroliers.

* D'après le rapport de la CNUCED de 2020, p.93-94.

** Ainsi un pétrolier est en moyenne 9 fois plus grand qu'il y a 20 ans, un porte-conteneur est 4 fois plus grand, un cargo l'est 3 fois plus et un vraquier 2 fois plus (source CNUCED, RMT 2020)

Ils ont en moyenne entre 9 et 10 ans. La flotte des cargos est deux fois plus âgée. L'âge moyen des navires lors de leur démantèlement est d'environ 30 ans, mais il est plus élevé pour les petits navires que pour les plus grands. Au rythme actuel, il faudrait attendre 2033 pour renouveler la moitié des pétroliers et des porte-conteneurs, 2037 pour renouveler la moitié des cargos et 2040 pour renouveler la moitié des vraquiers, chimiquiers, gaziers et ferries* .

Ainsi, les petits navires sont globalement plus âgés, et se renouvellent actuellement rapidement. Ils ont une durée d'exploitation généralement longue : les nouvelles unités construites en 2020 resteront en navigation jusqu'en 2050. Il faut donc les équiper tout de suite de technologies permettant de diminuer leur impact. En parallèle, la flotte existante des plus grands navires est plus jeune et ne sera pas renouvelée tout de suite. Elle doit donc être équipée en rétrofit sans attendre pour minimiser son impact.

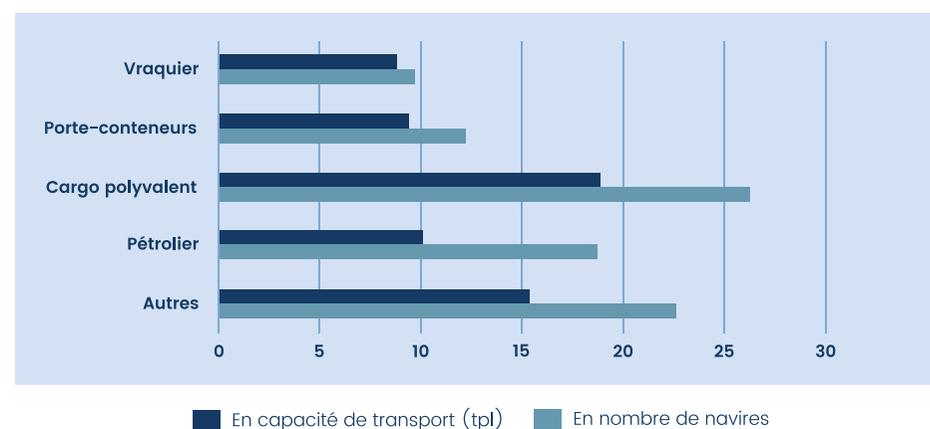
On compte en outre 4,56 millions de navires de pêche (chiffres de 2018) sur les océans et les mers, dont plus d'un million de navires pontés. De taille beaucoup plus modeste pour la grande majorité, mais néanmoins motorisés pour 63% d'entre eux, ces navires ne font pas l'objet de ce document, mais leur capacité à intégrer une propulsion par le vent sera présentée dans un autre volume.

* D'après l'article publié Jan Hoffmann le 25 février 2020, Decarbonizing maritime transport: Estimating fleet renewal trends based on ship scrapping patterns, Article No. 45 [UNCTAD Transport and Trade Facilitation Newsletter N°85 - First Quarter 2020] [consulté en ligne](#) le 4 novembre 2021

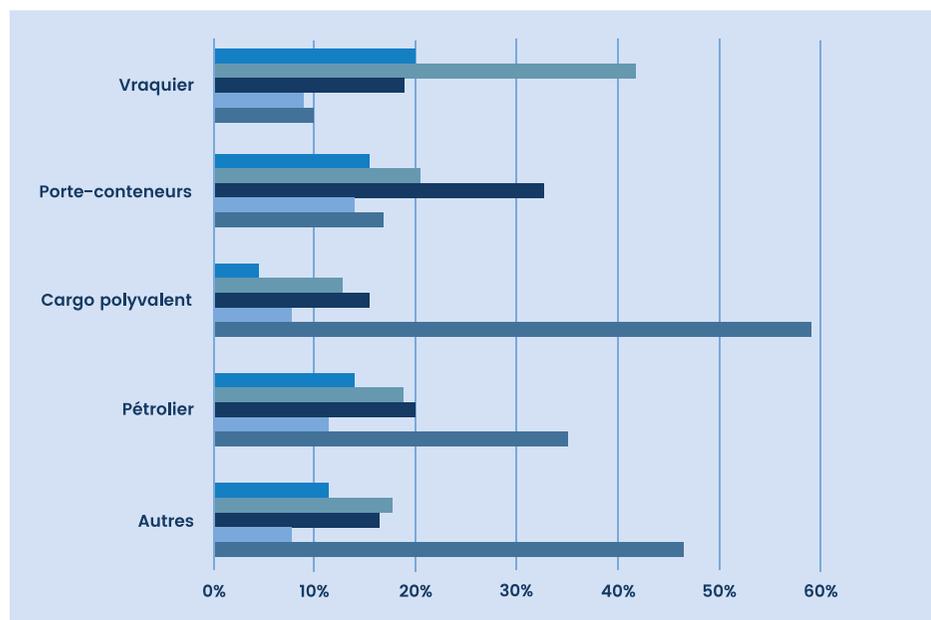
Tableau et graphiques récapitulatifs de l'âge moyen de la flotte mondiale

		Age moyen de la flotte					Age moyen en 2020
		0 - 4 ans	5 à 9 ans	10 à 14 ans	15 à 19 ans	> 20 ans	
Vraquier	Exprimé en nombre de navires	20%	42%	19%	9%	10%	9,69
	Exprimé en capacité (tpl)	23%	45%	17%	8%	7%	8,87
Porte-conteneurs	Exprimé en nombre de navires	16%	20%	33%	15%	17%	12,29
	Exprimé en capacité (tpl)	24%	29%	28%	12%	7%	9,43
Cargo polyvalent	Exprimé en nombre de navires	5%	12%	16%	8%	59%	26,3
	Exprimé en capacité (tpl)	9%	23%	20%	10%	39%	18,89
Pétrolier	Exprimé en nombre de navires	14%	19%	20%	11%	35%	18,77
	Exprimé en capacité (tpl)	25%	25%	27%	18%	6%	10,11
Autres	Exprimé en nombre de navires	11%	18%	16%	8%	47%	22,7
	Exprimé en capacité (tpl)	22%	17%	22%	11%	29%	15,42

Âge moyen de la flotte

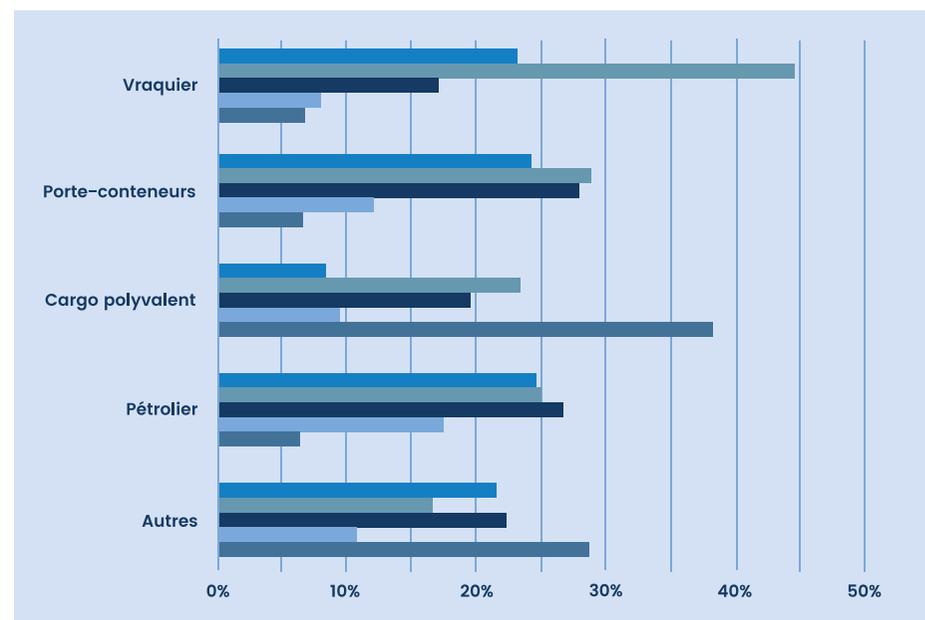


Âge moyen des navires par type
(en nombre de navires)



0-4 ans 5 à 9 ans 10 à 14 ans 15 à 19 ans >20 ans

Âge moyen des navires par type
(en tpi)



0-4 ans 5 à 9 ans 10 à 14 ans 15 à 19 ans >20 ans

Les impacts du transport maritime en matière de GES, d'infrastructures et de polluants atmosphériques

GES et polluants atmosphériques

Le CO₂ est le gaz le plus fréquemment évoqué en matière de réchauffement climatique. Il existe d'autres gaz que le CO₂ émis lors de la combustion des carburants fossiles, qui ont un impact sur l'effet de serre. Il en va ainsi du méthane (CH₄) dont le pouvoir de réchauffement global est 80 fois plus important que celui du CO₂ sur une échelle de 20 ans, des oxydes nitreux (N₂O) et du carbone suie (black carbon) qui, lorsqu'il est pris en compte, augmente les émissions totales de GES imputable aux transports maritimes internationaux. La 4^{ème} étude sur les GES réalisée par l'OMI en 2020 estime que les émissions de méthane ont augmenté de 87% entre 2012 et 2018, en raison de l'augmentation de la consommation de GNL dans des moteurs non optimisés (moteurs à combustible mixte générant des émissions spécifiques élevées).

Concentration, massification

D'après [le rapport de la CNUCED de 2020](#), les économies d'échelle obtenues par la mise en service de navires plus grands ne profitent pas nécessairement aux ports et aux fournisseurs de services de transports intérieurs, car les coûts totaux de transport augmentent souvent tout au long de la chaîne logistique. Il est fréquent qu'une augmentation du volume moyen d'escale ou de la taille moyenne des navires fasse culminer la demande en camions, aires de stockage et connexions intermodales et rende nécessaire d'investir davantage dans le dragage et l'achat de grues de plus grande taille. Les marchandises étant acheminées par des navires plus grands vers des ports moins nombreux, le nombre

d'entreprises actives dans le secteur est souvent réduit. Les économies de coûts réalisées par les acteurs maritimes ne se répercutent pas toujours sur les clients sous la forme de taux de fret moins élevés. Cela est plus manifeste dans les petits États insulaires en développement, qui ne comptent que quelques prestataires de services en activité. Les coûts supplémentaires devront être supportés par les chargeurs, les ports et les fournisseurs de services de transports intérieurs. Autrement dit, les économies d'échelle obtenues par la mise en service de navires plus grands profitent surtout aux transporteurs.

NB : Les rapports du CEREMA illustrent les effets des dragages : [Document 1](#) et [Document 2](#)

Polluants atmosphériques et santé

Les impacts d'un air pollué sur l'homme s'expriment à court terme par une mortalité et une morbidité qui sont accrues chez les sujets sensibles, mais aussi à long terme, par le développement de pathologies chez des personnes en bonne santé se traduisant par une mortalité et une diminution de l'espérance de vie qui peut dépasser 2 ans. Les impacts d'un air pollué sur l'environnement sont de plusieurs ordres : sous l'effet des oxydes de soufre et d'azote, les pluies deviennent acides et altèrent les sols et les cours d'eau, la faune et la flore sont affectées (déclin de populations pollinisatrices, nécrose des feuilles), et l'augmentation des concentrations en gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère entraîne un dérèglement climatique qui conduit au réchauffement de la planète. Cette pollution a un coût sanitaire important.

Une étude épidémiologique de Corbett et al*., 2007, démontre que 60 000 décès prématurés dans les zones côtières de l'Europe et de l'Asie du

* CORBETT J. J. et al, « [Mortality from ship emissions: global assessment](#) », Environmental Science and Technology, 2007, décembre, vol. 41, n°24, pp. 85512-8518

Sud et de l'Est seraient attribuables aux émissions atmosphériques des navires. En 2015 et 2016, les ONG France Nature Environnement et NABU réalisent une campagne de mesure de la qualité de l'air à Marseille et démontrent que le nombre de particules ultrafines aux abords du port où fait escale un grand navire de croisière est multiplié par 20 par rapport au bruit de fond de la ville, et par 70 à bord d'un navire de croisière. Les principaux polluants mis en cause pour la santé sont les oxydes (de soufre, d'azote) et les particules fines et ultrafines, et pour l'effet de serre, le dioxyde de carbone.

L'EEDI

L'EEDI concerne tous les navires de jauge brute supérieure à 400. Il est obligatoire depuis le 1er janvier 2013 (règle 20, Annexe VI MARPOL). Il s'agit d'un calcul théorique détaillé dans la résolution MEPC.212(63) qui compare les émissions du navire (en g de CO₂ émis) à la capacité et la vitesse de celui-ci, soit un rapport [puissance moteur / (vitesse x capacité)], en incluant des facteurs de correction liés à la nature des combustibles utilisés. Cet EEDI doit être inférieur à l'EEDI requis, une grandeur qui a été calculée et validée lors des MEPC et qui affiche une réduction tous les 5 ans à partir de 2013 afin d'atteindre une amélioration de 30% en 2025.

L'EEDI, qui fixe un seuil à ne pas dépasser, a sans doute permis d'améliorer la conception des navires, mais seulement en partie. Dès 2014, de nombreux navires respectaient déjà l'EEDI requis pour 2020, et 34% des porte-conteneurs et 43% des cargos étaient aux normes attendues pour 2030* .

Cela a conduit à accélérer l'entrée en vigueur de la phase 3 de l'EEDI dès 2022, sans attendre 2025. Les porte-conteneurs dont le tonnage est

supérieur à 80 000 tpl doivent même atteindre une amélioration de 35% et ceux de plus de 200 000, de 50%. Une phase 4 est en discussion. Cette exigence ne s'applique qu'aux navires dont le contrat de construction est passé après le 1er janvier 2013 et nécessite donc un renouvellement de la flotte pour être totalement effectif.

Ainsi sur :

- 10 903 pétroliers de plus de 4000 tpl, 7 974 ne sont pas soumis à l'EEDI,
- 1 847 gaziers de plus de 2 000 tpl, 1 220 ne sont pas soumis à l'EEDI
- 4 713 porte-conteneurs de plus de 10 000 tpl, 3 777 ne sont pas soumis à l'EEDI
- 11 421 vraquiers de plus de 10 000 tpl, 8 523 ne sont pas soumis à l'EEDI.

Tous ces navires non soumis à l'EEDI vont être soumis à l'EEXI.

NB : L'EEDI est vérifié par l'État du pavillon ou par un organisme dûment autorisé par elle (une société de classification) qui délivre le certificat de rendement énergétique (IEE), que le navire devra présenter à l'État du port lors de ses escales.

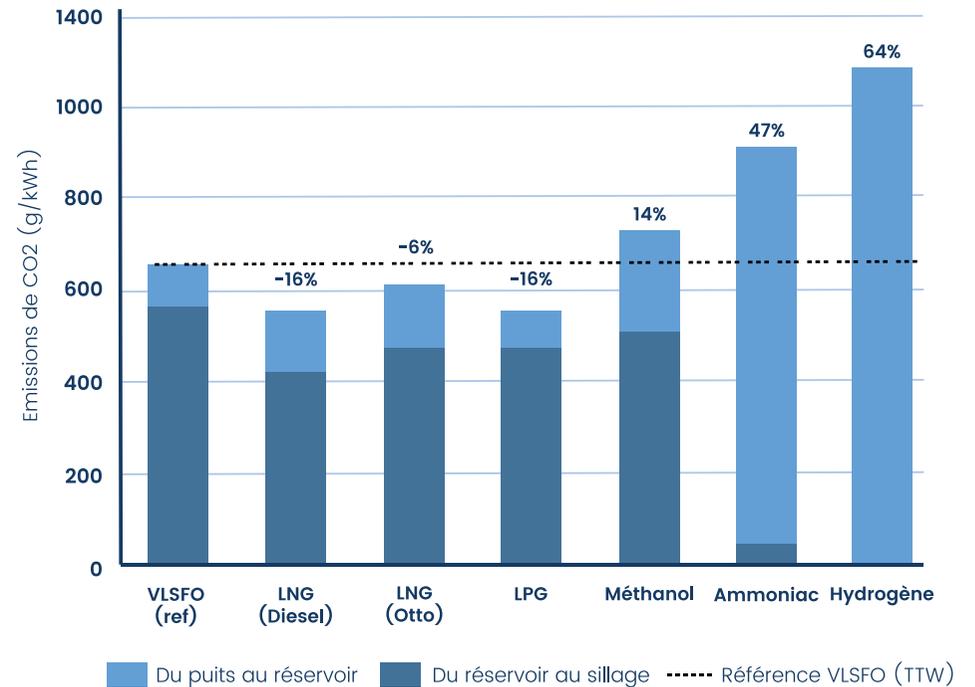
* Faber J. et al, CE Delft, Estimated Index Values of New Ships, Analysis of EIVs of Ships That Have Entered The Fleet Since 2009, Mars 2015

Émissions de CO2 liées à la production puis à la combustion de différents carburants

Cette figure* illustre les émissions de CO2 liées à la production de différents carburants non seulement lors de la combustion ("du réservoir au sillage") mais aussi lors de leur production ("du puits au réservoir"). Dans cette comparaison, l'hydrogène a été produit à partir de gaz naturel et l'ammoniac en ajoutant de l'azote. L'hydrogène destiné à être utilisé comme combustible est liquéfié pour être stocké. On le voit ici, la production de carburant alternatif ne permet pas de régler la diminution globale des émissions de CO2 liées au transport maritime. Il est donc nécessaire de diminuer autant que possible le besoin énergétique du navire, afin de n'assurer que ce besoin résiduel par les carburants.

- **VLSFO** : carburant allégé en soufre
- **LNG (Diesel)** : Gaz naturel liquéfié (à -162°C) utilisé par un moteur 2 ou 4 temps haute pression (allumage par compression)
- **LNG (Otto)** : Gaz naturel liquéfié (à -162°C) utilisé dans une motorisation à cycle d'Otto (allumage commandé)
- **LPG** : gaz de pétrole liquéfié (sous-produit dérivé du pétrole qui est constitué d'un mélange de propane et de butane comprimé)

Émissions de CO2 lors de la production puis la combustion du carburant (comparé à celle du VLSFO)



* Plevrakis G. et al., Setting the course to Low Carbon Shipping, View of the value chain, American Bureau of Shipping, 2021, 76 p.

Principes physiques de la propulsion par le vent

Un navire à voile (voile étant entendu au sens large : kite, aile, ...) est en contact avec l'air et l'eau, ce qui le soumet à des forces aérodynamiques et hydrodynamiques qui s'exercent sur la coque, la voile et les appendices (quille, gouvernail...).

Le vent capté par les voiles, ailes, kites d'un navire est directement traduit en portance et en traînée au niveau du système qui, par un jeu d'équilibre avec le plan antidérive que forme la coque - lorsqu'elle a été conçue à cet effet - et ses éventuels appendices, se traduit en partie en énergie propulsive. Un navire est au portant lorsque le vent vient de l'arrière, et au près lorsqu'il se rapproche du lit du vent.

Aérodynamique

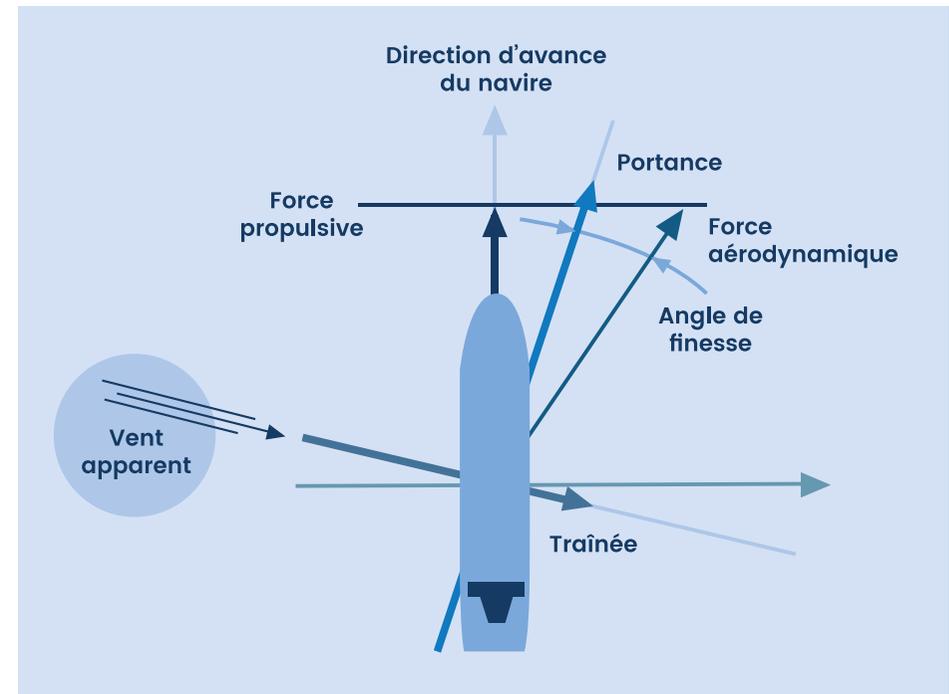
Le vent s'écoule le long d'une surface (voile, aile, kite...) qui a une certaine forme. Ce profil dévie les particules d'air de leur trajectoire rectiligne initiale. La force dite "vélique" qui s'exerce sur le navire se décompose en portance (lift en anglais) et la traînée (drag) dans un système de coordonnées lié à la direction du vent.

Elles sont décrites par des coefficients (C_x coefficient de traînée aérodynamique et C_z , coefficient de portance).

La portance et la traînée se calculent en multipliant la vitesse au carré, la surface de la voile, la masse volumique de l'air et les coefficients respectifs.

Ainsi, un navire équipé d'une aile de 340 m² d'une hauteur de 32m, avec un coefficient de portance de 1,9 et de traînée de 0,4 navigant à 12 nœuds

à 70° d'un vent de 23 nœuds (45° d'un vent apparent de 32 nœuds) génère une force aérodynamique totale d'environ 105 kN comprenant une force propulsive de 55 kN et une force latérale de dérive de 90 kN.

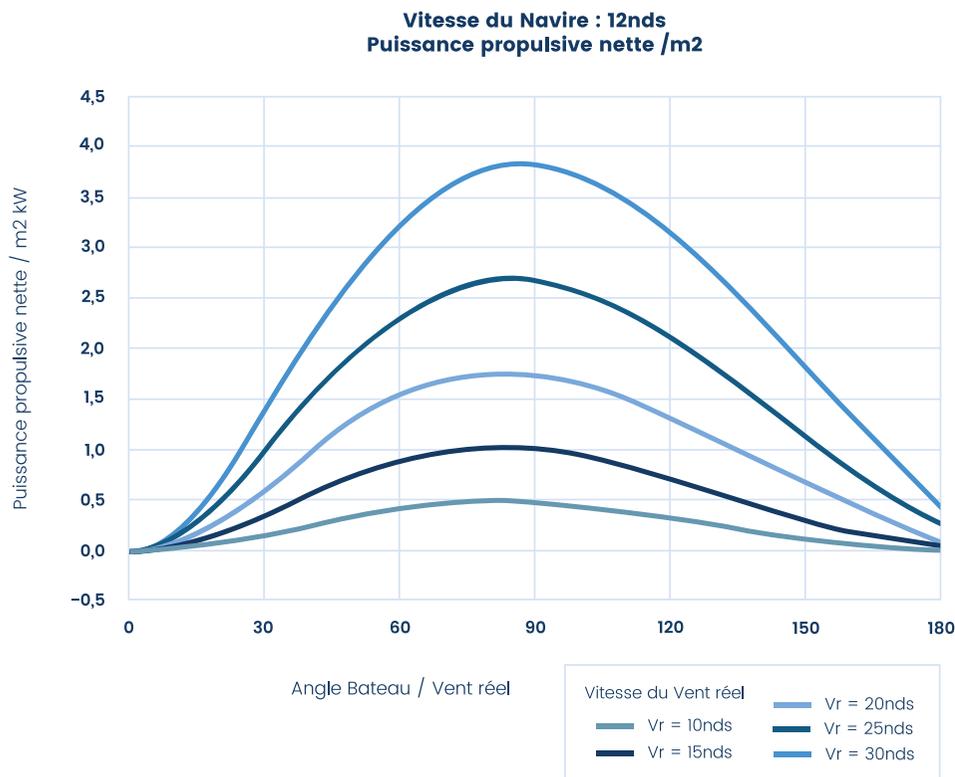


Forces exercées sur un navire

La finesse, qui est le rapport portance/traînée, représente la capacité du système à remonter au vent. La finesse des systèmes varie de 2 à 8 selon leur technologie. Les systèmes développant une très grande force au m² ont tendance à être les moins fins. Une finesse élevée est particulièrement adaptée aux navires en propulsion vélique principale, ou aux navires plus rapides car l'angle formé par le vent et la direction

du bateau se referme avec l'augmentation de la vitesse du navire.

A l'aide de ces coefficients, on peut construire les polaires de puissance propulsive du système, qui sont la courbe de la puissance propulsive en fonction de l'angle de vent avec le navire pour différentes vitesses de vent.



Exemple de polaire de puissance où la puissance est exprimée par unité de surface

Hydrodynamique

La force hydrodynamique quant à elle résulte des frottements de l'eau sur la coque et les appendices. Elle est décomposée en 2 forces, la force anti-dérive et la force de traînée hydrodynamique.

Propulsion, hélice et résistance

Le navire doit vaincre une certaine résistance à l'avancement pour être propulsé.

La résistance à l'avancement est constituée de 2 termes ;

- La résistance de frottements (qui dépend directement de la surface mouillée de la coque du navire)
- La résistance de vagues, car le navire en se déplaçant génère un train de vagues qui dissipe de l'énergie. Cette dernière résistance est plus complexe à calculer, et dépend principalement de la vitesse du navire et des formes de la carène (la carène gagne à être longue et effilée pour des vitesses élevées).

La résistance à l'avancement d'un navire augmente plus vite que le carré de la vitesse de celui-ci. Cela signifie que pour augmenter sa vitesse de 20% un navire devra augmenter sa puissance propulsive de plus de 50%.

Pour les navires motorisés, seule une partie de la puissance du moteur qui entraîne l'axe de l'hélice est transformée en puissance propulsive, car une partie de l'énergie est dissipée dans les frottements mécaniques, les hélices et l'interaction hélice-carène. Généralement, le rendement global entre la puissance mécanique en sortie d'un moteur et la puissance réellement transmise à la coque est compris entre 0.55 et 0.65. La puissance propulsive tirée du vent, quant à elle, est directement transmise à la coque ce qui évite toute perte de rendement.

Bien entendu, tous ces éléments sont affectés, pendant la navigation, par les états de mer, de vent et de courants, qui peuvent augmenter fortement la résistance à l'avancement, et donc réduire la vitesse du navire. Dans ce domaine, la propulsion par le vent peut avoir un effet bénéfique, d'une part via la mise en oeuvre des outils de routage qui permettent d'éviter les zones les plus "mal pavées", et d'autre part car les systèmes de propulsion vélique peuvent amortir les mouvements du navire en s'appuyant sur le vent.

Résultats compilés des études sur les performances des navires équipés d'une propulsion par le vent

La littérature scientifique s'enrichit régulièrement d'essais comparatifs. Cependant, ils sont aujourd'hui majoritairement alimentés par les technologies de rotors et de voiles souples, ainsi que ponctuellement de kites.

Les résultats présentés ci-dessous ne reflètent qu'une partie des technologies, expérimentées dans des conditions spécifiques.

Ainsi, les rotors Flettner sont comparés à des voiles souples comme les Dynarigs par des simulations sur des navires identiques. Ces technologies mènent à des économies sur des trajets et des navires où le rotor est particulièrement intéressant selon les études de Lu & Ringsberg (2019), Nelissen et al. (2016), et Tristan Smith et al. (2013).

Traut et al. (2014) qui ont comparé la contribution d'un rotor Flettner et d'un kite sur 5 routes ont constaté que la puissance du kite est plus importante mais plus variable que celle du rotor Flettner, ce dernier générant une puissance de propulsion sur une plus large gamme de directions de vent. Cependant, un seul rotor était installé alors que plusieurs peuvent l'être, améliorant sans doute la puissance totale du système. La performance des rotors Flettner semble moins sensible aux conditions météorologiques. En revanche, dans cette étude le routage n'avait pas été optimisé pour trouver les vents les plus favorables. On trouve un résultat similaire dans Nelissen et al. (2016).

Les kites présentent un certain nombre d'avantages par rapport aux rotors Flettner car ils peuvent toucher des vents plus forts à une altitude

plus élevée, donc apporter plus de propulsion et générer plus d'économie de carburant. Ils sont plus sûrs pour le navire en raison d'un impact plus faible sur le moment d'inclinaison en roulis, et ils prennent peu de place sur le pont (Naaijen et al., 2006). Toutefois, cet impact sur le moment d'inclinaison en roulis devrait être étudié plus avant sur des installations réelles et en conditions réelles de navigation.

Les dimensions des rotors et des ailes peuvent augmenter avec la taille du navire, et donc être plus puissants. Les kites n'occupent qu'un faible espace sur le pont, ce qui les rend particulièrement intéressants pour les porte-conteneurs (Nelissen et al., 2016).

Les kites produisent la plus grande puissance propulsive sous vent arrière, tandis que les rotors Flettner optimisent leur propulsion avec des vents de côté (De Marco et al., 2016 ; Leloup et al., 2016 ; Lu & Ringsberg, 2019 ; Nelissen et al., 2016 ; Ran et al., 2013 ; Traut et al., 2014).

Bien que les économies de carburant absolues augmentent pour les rotors et les ailes lorsque la vitesse du navire augmente, les économies de carburant relatives diminuent. En effet, lorsque la vitesse augmente, la demande de puissance moteur du navire a un effet plus important sur la consommation de carburant que la contribution des rotors ou des ailes (Lu & Ringsberg, 2019 ; Nelissen et al., 2016 ; Tristan Smith et al., 2013). Les kites génèrent plus d'économies absolues à vitesse réduite que les rotors (Nelissen et al., 2016 ; Ran et al., 2013).

Modélisation du vent dans la réglementation internationale (OMI)

La modélisation du vent dans la réglementation internationale (OMI) poursuit une visée calculatoire, et non une vision "réaliste" du vent.

Lors du Comité de protection de l'environnement 62 en mai 2011, le document d'information MEPC.62/INF34 a été partagé pour préciser la probabilité des vents rencontrés sur les principales routes maritimes. Cette information a été rédigée dans le cadre de l'estimation de la puissance propulsive des systèmes véliques pour calculer l'indice nominal de rendement énergétique des navires ou EEDI, règle 20 de l'annexe VI de la convention MARPOL.

Pour cela, les principales routes maritimes mondiales ont été schématisées. Il ne s'agit pas de routes liées à une navigation propulsée par le vent, mais de routes orthodromiques, (c'est-à-dire la route la plus courte à la surface du globe terrestre entre deux points) suivies par la marine marchande depuis un siècle.

Sur cette carte des principales routes maritimes, des cartes de conditions de vent ont été élaborées, basées sur 868 500 données individuelles de vent provenant de WetterWelt, 2011. Pour chaque point, une probabilité de vitesse de vent et de direction par rapport au cap du navire a été estimée et placée dans une matrice qui sert de base dorénavant au calcul de cet indice EEDI.

Ce document conclut que sur ces routes maritimes, les vents sont principalement orientés en vent de face ou vent portant, avec une plus forte probabilité (>10%) d'une vitesse entre 4 et 8 m/s (3 à 4 beauforts). Ces résultats sont extrêmement généralistes : il s'agit de statistiques appliquées à des routes non optimisées pour la propulsion vélique. Ils

permettent d'estimer un indice d'efficacité énergétique du design du navire mais ne peuvent être utilisés pour refléter la réalité opérationnelle des conditions de vent rencontrées en mer.

Les eaux territoriales, les ports, la flotte française

La France était située au 1er janvier 2020 au 28ème rang des flottes mondiales – elle représente 0,4% du tonnage mondial, et au 12ème rang des flottes européennes (classement par pavillon).

Elle comprend 190 navires de transport (pétrole, gaz, navire de charge et à passagers) et 233 navires liés aux services maritimes (navires spécialisés, offshore, portuaires) de jauge supérieure à 100 (exprimée en UMS). La moitié des navires de transport sont inscrits au registre international français (RIF) tandis que la moitié des navires de services sont inscrits au registre métropolitain, et que les registres d'outre-mer recensent 20% des navires de transport et 6% de navires de service.

La flotte de transport française est relativement jeune – l'âge moyen étant d'une dizaine d'années, la moyenne européenne et mondiale étant de 15 ans, mais reflète des disparités entre pétrolier, gazier et porte-conteneurs relativement jeunes, et navires à passager plus anciens.

Les ports qui jalonnent les côtes françaises ont vu transiter 307,7 millions de tonnes de marchandises en 2020 soit 13% de moins qu'en 2019 (354 millions de tonnes) en raison des effets cumulés de mouvements sociaux fin 2019-début 2020, puis des deux vagues liées à la pandémie du coronavirus, du BREXIT avant l'accord signé en décembre 2020 – et enfin d'une faible récolte céréalière en 2020.

Pour comparaison, le transit du port de Rotterdam atteint 436 millions de tonnes, celui d'Anvers 230 millions et celui de Hambourg, 126 millions en 2020. Les ports de Ningbo, Shanghai et Qingdao en Chine accueillent respectivement 1 414 millions, 651 millions et 605 millions de tonnes de marchandises, talonnés par Singapour en Malaisie (590 millions de

tonnes) et Busan en Corée (411 millions de tonnes).

Le trafic de conteneurs est relativement faible en France comparé aux ports d'Europe du Nord. Il reste principalement concentré sur la vallée de la Seine, 2,4 millions d'EVP sur Haropa qui réalise 22% de son trafic avec la Chine, et Marseille (1,3 millions d'EVP liés notamment au trafic avec les États-Unis et l'Algérie).

Les ports Outre-Mer occupent une place stratégique pour alimenter le marché local en produits manufacturés et de première nécessité, et présentent un potentiel pour devenir des hubs régionaux que les lignes maritimes peuvent utiliser pour faire du transbordement.

Bibliographie

Adamopoulos A. et al., Decarbonisation, a special report, Lloyd's List, 2021, 30 p., consulté en ligne le 5 novembre 2021

Argyros D. (2015). Wind-powered shipping: A review of commercial, regulatory and technical factors affecting uptake of wind-assisted propulsion. Lloyd's Register Marine. http://wind-ship.org/wp-content/uploads/2021/02/Wind_powered_shipping_230215_LR.pdf

Bell M. et al., Reducing the maritime sector's contribution to climate change and air pollution, Economic opportunities from low and zero emission shipping. A report for the Department for Transport, Frontier Economics, Juillet 2019, 51 p., [consulté en ligne](#) le 5 novembre 2021

Chou T. et al, D 5.B New Wind Propulsion Technology, A Literature Review of Recent Adoptions, Interreg North Sea Region WASP, 24.09.2020, 32 p.

Corbett J. J. et al, « Mortality from ship emissions: global assessment », Environmental Science and Technology, 2007, décembre, vol. 41, n°24, pp. 85512-8518, https://www.researchgate.net/publication/5650440_Mortality_from_Ship_Emissions_A_Global_Assessment

Kinst J. et al., The EU system for the certification of sustainable biofuels, special report, 2016, European Court of auditors, 56 p.

Krantz R., Søggaard K., Smith T., The scale of investment needed to decarbonise international shipping, Insight brief, janvier 2020, [consulté en ligne](#) le 5 novembre 2021

Leloup R. et al. (2016), A continuous and analytical modeling for kites as auxiliary propulsion devoted to merchant ships, including fuel saving estimation. Renewable Energy, 86, 483-496.

Faber J. et al., Fourth IMO GHG Study, CE Delft, Juillet 2020, 288 p.

Métayer-Dam H. et Amauric du Chaffaut F., Bilan annuel 2019, Surveillance des pollutions en mer, rapport Direction des Affaires Maritimes, juillet 2020, [consulté en ligne](#) le 5 novembre 2021

Nelissen D. et al., Study on the analysis of the market potentials and market barriers for wind propulsion technologies, CE Delft, novembre 2016, 127p., [consulté en ligne](https://research.chalmers.se/en/publication/245854) le 5 novembre 2021 <https://research.chalmers.se/en/publication/245854>

Plevrakis G. et al., Setting the course to Low Carbon Shipping, View of the value chain, American Bureau of Shipping, 202, 76 p. [consulté en ligne](#) le 5 novembre 2021

Rehmatulla N., Parker S., Smith T. & Stulgis, V. (2017). Wind technologies: Opportunities and barriers to a low carbon shipping industry. Marine

Policy, 75, 217–226. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2015.12.021>

Sirimanne S. N. et al., Review of Maritime Transport 2020, UNCTAD, ISBN 978-92-1-112993-9, 2020, 159 p.

Tillig F. & Ringsberg J. W., (2019). A 4 DOF simulation model developed for fuel consumption prediction of ships at sea. *Ships and Offshore Structures*, 14(sup1), 112–120. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17445302.2018.1559912>

Tourret P. Les émissions du transport maritime: Questions économiques et technologiques, Note de synthèse n°204, ISEMAR, novembre 2018, [consulté en ligne](#) le 5 novembre 2021

Valero C., Les registres : prérogatives étatiques et logiques marchandes. Note de synthèse 208, ISEMAR, mars 2019, [consulté en ligne](#) le 5 novembre 2021

Vercher C. et Palpacuer F., Chaîne globale de valeur, in Dictionnaire critique de la RSE, Villeneuve d'Ascq, Presses Universitaires du Septentrion, 2013, 498 p.

Ouvrages collectifs

DNV GL – Maritime, Assessment of selected alternative fuels and technologies, Juin 2019, ID 1765300

Maersk Mc-Kinney Moller Center for Zero Carbon Shipping, Industry transition strategy, octobre 2021, [consulté en ligne](#) le 5 novembre 2021

Shipping Market Review, Danish Ship Finance, novembre 2021, [consulté en ligne](#) le 6 novembre 2021, 63 p.

Documents officiels européens et internationaux

COM(2020) 3184, 2019 annual report on CO2 Emissions from maritime transport, Commission Européenne, 19 mai 2020, 5 p.

COM(2021) 562 final, Proposition de règlement du parlement européen et du conseil relatif à l'utilisation de carburants renouvelables et bas carbone dans le transport maritime et modifiant la directive 2009/16/CE, Bruxelles, 14 juillet 2021

MARPOL, édition récapitulative de 2017, Organisation Maritime Internationale, publication de l'OMI, 2017, 488p.

Rés. MEPC.304(72), Initial IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships, adoptée le 13 avril 2018 par le MEPC lors de la 72ème session

Études permettant de qualifier les performances des systèmes propulsifs par le vent

Bentin M. et al. (2016), A New Routing Optimization Tool–influence of Wind and Waves on Fuel Consumption of Ships with and without Wind Assisted Ship Propulsion Systems. *Transportation Research Procedia*, 14, 153– 162. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.051>

Comer, B., Chen C., Stolz, D., Rutherford D. (2019). Rotors and bubbles: Route-based assessment of innovative technologies to reduce ship fuel consumption and emissions. *International Council on Clean Transportation*. Working paper 2019-11. Available at: https://theicct.org/sites/default/files/publications/Rotors_and_bubbles_2019_05_12.pdf.

Lu, R., & Ringsberg, J. W. (2019). Ship energy performance study of three wind-assisted ship propulsion technologies including a parametric study of the Flettner rotor technology. *Ships and Offshore Structures*, 0(0), 1–10. <https://doi.org/10.1080/17445302.2019.1612544>

Nelissen D. et al., Study on the analysis of the market potentials and market barriers for wind propulsion technologies, CE Delft, novembre 2016, 127p., consulté en ligne le 5 novembre 2021 <https://research.chalmers.se/en/publication/245854>

Smith T., Newton, P., Winn, G., & Rosa, A. G. L. (2013). Analysis techniques for evaluating the fuel savings associated with wind assistance <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/1413459/1/Newton%20et%20al.pdf>

Seguin V. et al., Neoliner 136 m, un navire cargo à propulsion vélique permettant une réduction majeure de consommation d'énergie fossile et des émissions associées, ATMA, 2019, 16p.

Traut M. et al. (2014). Propulsive power contribution of a kite and a Flettner rotor on selected shipping routes. *Applied Energy*, 113, 362–372. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.026>

Sites Internet

Code Général des Impôts mettant en place un mécanisme de suramortissement pour le verdissement de la flotte : https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000042913782

Réseau international de la propulsion par le vent : <https://www.wind-ship.org/en/grid-homepage/>

Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné en France: <https://www.economie.gouv.fr/plan-de-relance/profils/collectivites/strategie-nationale-developpement-hydrogene>

Notes & sources complémentaires

1. Vercher C. et Palpacuer F., Chaîne globale de valeur, in Dictionnaire critique de la RSE, Villeneuve d'Ascq, Presses Universitaires du Septentrion, 2013, p.39

2. Turret P. Les émissions du transport maritime : Questions économiques et technologiques, Note de synthèse n°204, ISEMAR, novembre 2018, [consulté en ligne](#) le 5 novembre 2021.

3. Maersk Mc-Kinney Moller Center for Zero Carbon Shipping, Industry transition strategy, octobre 2021, [consulté en ligne](#) le 5 novembre 2021.

4. Chiffres issus de l'Institut National démographique, consulté en ligne le 5 novembre 2021 et du site des Nations Unies, [consulté en ligne](#) le 5 novembre 2021

5. J. Faber et al., Fourth IMO GHG Study, CE Delft, Juillet 2020, 288 p.

6. Ces résultats sont basés sur une répartition des émissions fondée sur les navires. Une autre évaluation estime la répartition des émissions selon les voyages et exclut les émissions du transport maritime nationale, ce

qui donne le chiffre de à 740 millions de tonnes de CO2 en 2018 contre 701 en 2012, soit une augmentation de 5,6%.

7. Chiffres issus du rapport annuel sur le MRV de la Commission européenne, 2019 annual report on CO2 Emissions from maritime transport, C(2020) 3184, Commission Européenne, 19 mai 2020, 5 p. voir p.3

8. L'intensité carbone s'est améliorée de l'ordre de 23,6% lorsque l'on considère l'indice d'efficacité annuelle (AER c'est-à-dire les émissions de GES rapportées à la quantité théorique de marchandises que le navire peut transporter) ou de 33,3% lorsque l'on considère l'indice d'efficacité opérationnelle (EEOI c'est-à-dire les émissions de GES rapportées à la quantité réelle de marchandises que le navire a transportées)

9. Sirimanne S. N. et al., Review of Maritime Transport 2020, UNCTAD, ISBN 978-92-1-112993-9, 2020, 159 p. [consulté en ligne](#) le 5 novembre 2021, voir p.8

10. Chiffres de 2018. J. Faber et al., Fourth IMO GHG Study, CE Delft, Juillet 2020, 288 p.

11. Métayer-Dam H. et Amauric du Chaffaut F., Bilan annuel 2019, Surveillance des pollutions en mer, rapport Direction des Affaires Maritimes, juillet 2020, [consulté en ligne](#) le 5 novembre 2021

12. Plevrakis G. et al., Setting the course to Low Carbon Shipping, View of the value chain, American Bureau of Shipping, 202, 76 p., voir p. 29 à 33

13. MARPOL, Chapitre 4, règle 19, paragraphe 3.

14. Maersk Mc-Kinney Moller Center for Zero Carbon Shipping, Industry transition strategy, octobre 2021, [consulté en ligne](#) le 5 novembre 2021.

15. Draft FuelEuMaritime proposal, quantifying the risk of a climate and environmental disaster in the making, Transport & Environnement, juin 2021, [consulté en ligne](#) le 5 novembre 2021, voir p.5

16. Krantz R., Søgaaard K., Smith T., The scale of investment needed to decarbonise international shipping, Insight brief, janvier 2020, [consulté en ligne](#) le 5 novembre 2021

17. La difficulté des carburants produits grâce à une énergie verte réside notamment dans le faible rendement de la chaîne de production : ainsi, l'ADEME identifie un rendement global de 25% voire 30% sur la chaîne de l'hydrogène de la source à son usage en pile à combustible

18. Adamopoulos A. et al., Decarbonisation, a special report, Lloyd's List, 2021, 30 p., [consulté en ligne](#) le 5 novembre 2021, voir p. 18

19. Maersk Mc-Kinney Moller Center for Zero Carbon Shipping, Industry transition strategy, octobre 2021, [consulté en ligne](#) le 5 novembre 2021.

20. Le Bureau Véritas a ainsi validé la proposition du Tradewings, un porte-conteneur destiné au cabotage de 2500 EVP, 196 m de long et 6 profils épais, tandis que le Meltem prévoit 1830 EVP pour 185 m de long et 8 profils épais, voir [l'article consulté en ligne](#) le 5 novembre 2021.

21. On peut le visualiser grâce à des interfaces comme celle proposée ici qui permet une visualisation des conditions météorologiques mondiales prédites par des superordinateurs et mises à jour toutes les trois heures.

22. Au niveau mondial, des modèles globaux à maille fixe ou à maille variable sont utilisés. Ils sont plus précis sur certaines zones géographiques (par exemple le modèle Arpège présente une meilleure sensibilité sur la France que sur l'Australie), d'où l'intérêt de comparer les modèles en fonction de la zone considérée. Température et précipitations sont plus faciles à prévoir que le vent mais les modèles sont actuellement de très bonne qualité.

Les prévisions à court terme sont basées sur des modèles soit déterministes soit probabilistes à partir d'observations atmosphériques. Dans la première méthode, on cherche à déterminer une valeur par point géographique. Dans la seconde, utilisée depuis une dizaine d'années, on cherche à afficher un niveau d'incertitude autour d'une valeur (on parle de seuil de risque autour d'une valeur) : par exemple la probabilité d'avoir un vent supérieur à 20 nœuds dans cette zone est supérieure à 80%.

23. En mer, un certain nombre de navires participent à ces relevés en effectuant des lâchers de ballons pour le compte de Météo France.

24. Application Marin Blue Route : <https://blueroute.application.marin.nl>

25. Satori : <https://satori.d-ice.net>

26. DNV GL – Maritime, Assessment of selected alternative fuels and technologies, Juin 2019, ID 1765300, [consulté en ligne](#) le 5 novembre 2021.

27. Celle-ci a été estimée dans le cadre d'une étude menée par la Chalmers University of Technology (Olsson & Carlsson, Suède, 2020) sur un navire propulsé par le vent destiné au transport de véhicules. Des méthodes liées à l'analyse du cycle de vie (selon la norme ISO 14040/2006) et au coût y sont appliquées en comparant les performances du navire propulsé par le vent avec les performances de la même coque propulsée uniquement par du GNL, du biogaz ou du biométhane. Dans cette étude, l'installation de systèmes de propulsion par le vent entraîne un investissement initial plus élevé, ainsi que des émissions de GES lors de la phase de construction et de démantèlement plus importantes que pour un navire sans propulsion par le vent. Mais c'est la phase d'opération du navire qui représente 99% des émissions de GES. Or, la réduction de la consommation de carburant en opération (ici de 80%) entraîne dès lors des gains financiers et environnementaux qui positionnent la propulsion par le vent bien au-dessus des configurations de navire utilisant le GNL, le biogaz et le biométhane. En matière de réduction des émissions, dans l'étude le biométhane pourrait concurrencer la propulsion par le vent, mais le coût associé est extrêmement élevé (3 à 10 fois plus important).

L'analyse de cycle de vie du système propulsif considère ici des ailes construites en acier. Les émissions amont sont liées à la production de cet acier, donc avec un facteur d'émission important, mais qui diminue en raison de sa grande recyclabilité (estimée ici à 81%). Le navire est considéré en service pendant 30 ans, navigant à 8 ou à 11,4 nœuds.

Dans cette étude, l'analyse du cycle de vie d'un navire équipé d'un système propulsif par le vent positionne toujours le vent comme une solution de premier choix.

28. La Convention internationale de 1978 sur les normes de formation des gens de mer, de délivrance des brevets et de veille ou STCW.

29. Le projet DIGI4MER dans lequel est développé ce référentiel de formation est financé dans le cadre du Programme d'Investissement d'Avenir 3.

30. Chou T. et al., D 5.B New Wind Propulsion Technology, A Literature Review of Recent Adoptions, Interreg North Sea Region WASP, 24.09.2020, 32 p., [consulté en ligne](#) le 5 novembre 2021, voir p. 18 à 20.

31. Nelissen D. et al., Study on the analysis of the market potentials and market barriers for wind propulsion technologies, CE Delft, novembre 2016, 127p., [consulté en ligne](#) le 5 novembre 2021, voir p.7

32. Bell M. et al., Reducing the maritime sector's contribution to climate change and air pollution, Economic opportunities from low and zero emission shipping. A report for the Department for Transport, Frontier Economics, Juillet 2019, 51 p., [consulté en ligne](#) le 5 novembre 2021, voir p.44.

33. Sirimanne S.N. et al., Résumé de l'étude sur les transports maritimes de 2020, CNUCED, 2020, 17 p., [consulté en ligne](#) le 5 novembre 2021, voir p.13

34. Shipping Market Review, Danish Ship Finance, novembre 2021, [consulté en ligne](#) le 6 novembre 2021, 63 p., voir p.10

35. Il serait cependant intéressant de disposer de ces données pour les autres territoires outre-mer, qui utilisent fortement le transport maritime.

36. Le cadre de référence appelé « principes Poséidon » a été établi à l'initiative d'établissements bancaires en juin 2019 pour intégrer la dimension climatique dans leurs critères de décision pour le financement du transport maritime. Ces principes devraient permettre aux institutions financières d'aligner leurs portefeuilles de financement de navires avec un comportement environnemental responsable et d'inciter à la

décarbonation du transport maritime international. Ils ont été signés notamment par BNP Paribas, Bpifrance, Société Générale, Crédit Agricole, CIC et Crédit Mutuel Alliance Fédérale.

37. Exemple issu du suivi MRV de 2019 mis en place par la Commission Européenne depuis le règlement 2015/757

38. Smith & al., Wind technologies: opportunities and barriers to a low carbon shipping industry, UCL& Carbon War Room 2017 (Marine Policy 75 (2017) 217-226

39. Bilan thématique Navire, Edition 2020, Bilan thématique du Programme d'investissements d'avenir (PIA), référence 010931, [consulté en ligne](#) le 5 novembre 2021

40. Dispositif [NaMKü](#) pour la modernisation des navires côtiers présenté par le Ministère fédéral pour les transports et l'infrastructure numérique. Ligne directrice relative à la promotion de la modernisation durable des navires côtiers.

Exploiter le vent pour propulser la flotte des navires marchands est une solution déjà disponible pour améliorer significativement l'empreinte carbone du transport maritime, responsable de 3% des émissions mondiales de gaz à effet de serre.

La France possède une avance technologique et un écosystème favorable qui pourraient se transformer rapidement en une filière industrielle d'exception grâce à un soutien public et privé approprié.

La course pour décarboner l'économie étant engagée mondialement, l'offre française doit se démarquer rapidement et fortement pour être créatrice d'emplois et contribuer significativement à un transport maritime plus propre.

Wind Ship vous propose de découvrir, grâce à son livre blanc, les fondamentaux de la propulsion des navires par le vent: une proposition crédible, performante et des technologies disponibles dès aujourd'hui pour assurer la durabilité du transport.



Contact : lise.detrumont@wind-ship.fr

www.wind-ship.fr