

Panorama des activités maritimes 2024

LE TRANSPORT MARITIME

La croissance de l'économie mondiale est restée stable à 3 % en 2024 dans une conjoncture marquée par l'instabilité et les conflits en Ukraine et au Moyen-Orient. Les attaques des rebelles Houthis contre le trafic maritime en Mer Rouge ont affecté une des plus importantes voies maritimes entre Est et Ouest. Enfin les déclarations du candidat Trump, élu président des USA en novembre, ont laissé présager une guerre à venir des droits de douanes. Selon l'UNCTAD¹, la croissance mondiale pourrait chuter en 2025 sous les 2,5 %, seuil considéré comme marquant une récession globale.

Le trafic maritime a montré en 2024 une croissance moyenne stable à 2,3 %, avec néanmoins des performances variées suivant les segments, le vrac sec, le pétrole et le gaz ralentissant de 3,4 % à 1,7 % et de 3 % à 2,6 %, respectivement alors que le segment des conteneurs de ligne a connu un rebond significatif à 3,8 %, se rapprochant du niveau exceptionnel de 2021 après Covid.

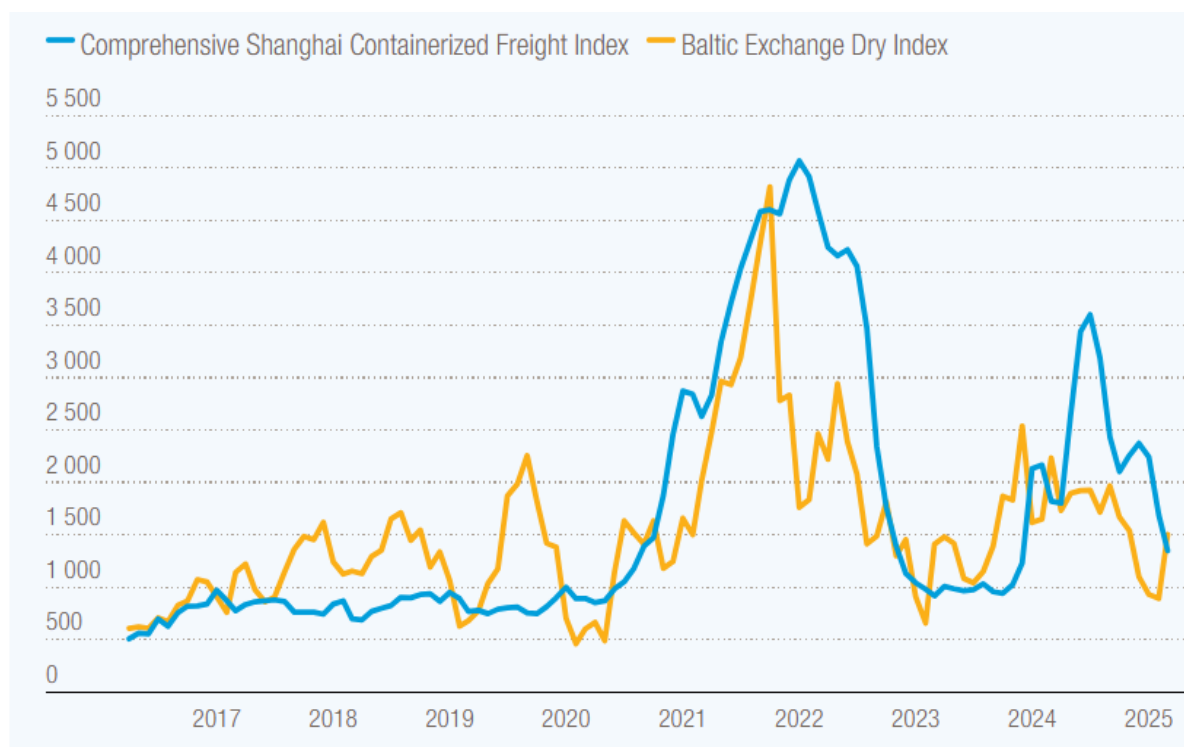
Global Trade, World GDP and Active Fleet Growth (mn Dwt)



(source: BRS Revue annuelle 2025)

La fin de 2024 a marqué un sursaut du commerce maritime alimenté par les commandes anticipées dans l'attente de l'annonce de nouveaux droits de douane. Il en a été de même pour les taux de fret, notamment conteneurisé, qui ont dû de plus absorber les surcoûts de l'évitement de la Mer Rouge. Le début de 2025 a vu un rapide retour à des taux historiques d'avant COVID.

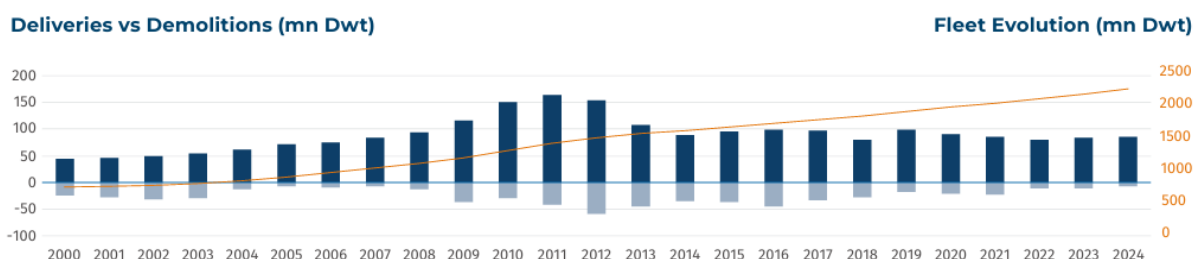
¹Trade and development foresights 2025, United Nations Conference on Trade and Development, avril 2025



(Source: UN Trade and Development (UNCTAD) based on Clarkson Shipping Intelligence Network)

En 2024, le nombre de passagers de croisière a fait un bond de 31,7 millions en 2023 à 34,7 millions, niveau bien supérieur au creux de 4,6 millions en 2021, mais il a également dépassé le précédent record de 29,7 millions de passagers de 2019. Les compagnies de croisières ont renoué avec les constructions neuves totalisant 37 commandes en 2024, un nouveau record historique. Les trois chantiers européens (Fincantieri, Meyer Werft et Chantiers de l'Atlantique) possédaient à fin 2024 un carnet de 67 navires avec 28 commandes nouvelles.

En 2024, la flotte mondiale a continué sa croissance à 2 298 millions de tpl (contre 2 219 un an plus tôt).



(Source: BRS Revue annuelle 2025)

Décarbonation

L'année 2024 a été en Europe la première année d'application des quotas carbone (SEQUE/ETS) au transport maritime. Un marché carbone relativement atone, en raison de la baisse significative des émissions industrielles, a permis de stabiliser, voire de faire baisser le coût du quota. Depuis 2018, les émissions déclarées par les navires faisant escale dans les ports de l'Espace économique européen (EEE) sont passées de 145,9 millions de tonnes de CO₂ en 2018 à 126,4 millions de tonnes en 2023 (-13 %). Seuls 50 % des émissions sont prises en compte pour les transits en provenance ou vers des destinations extra-européennes. En 2024, seuls 40 % des émissions éligibles sont soumises à l'ETS.

Le système ETS couvre les émissions du réservoir au sillage (TtW) et conduit à échanger des quotas sur la base d'un prix du CO₂ fluctuant. Le règlement Fuel EU maritime couvre l'intensité des émissions du puits au sillage (WtW). Adopté en juillet 2023, ce règlement fixe des objectifs de réduction des émissions de GES pour les navires de plus de 5 000 Gt par tranches de cinq ans de 2025 à 2050. Les objectifs sont fixés en fonction de l'intensité des émissions de gaz à effet de serre de référence de 91,16 gCO₂e/MJ pour 2020 (ou 3,76 g CO₂/g carburant), qui est le facteur d'émission de poids des émissions VLSFO/HSFO. Commencant par une réduction de 2 % par rapport aux niveaux de 2020 à partir de 2025, les objectifs de réduction passent à une réduction requise de 80 % d'ici 2050.

La réglementation prévoit également une pénétration de 2 % des carburants renouvelables d'origine non biologique (RFNBO ou e-fuels) d'ici 2034, si d'ici 2031, les RFNBO représentent moins de 1 % du mix énergétique. Par ailleurs, le règlement permet d'associer plusieurs navires (d'une même flotte ou pas), le *poolingmechanism*, afin de compenser la sous-performance de certains navires par la surperformance d'autres.

Dans l'état actuel des choses, selon BRS, l'industrie maritime sera confrontée à des pénalités dépassant 1 milliard d'euros en 2025, qui pourraient atteindre 4 milliards d'euros d'ici 2030 si aucune mesure d'atténuation n'est prise.

LA CONSTRUCTION NAVALE CIVIL

Les commandes de nouveaux navires ont atteint en 2024 un total de 193,1 millions de tpl (pour près de 2500 navires), une augmentation de près de 50 % par rapport à 2023. Cependant, les livraisons, qui reflètent les capacités actuelles de production des chantiers, n'ont que légèrement augmenté par rapport à 2023 (3 % à 1564 navires).

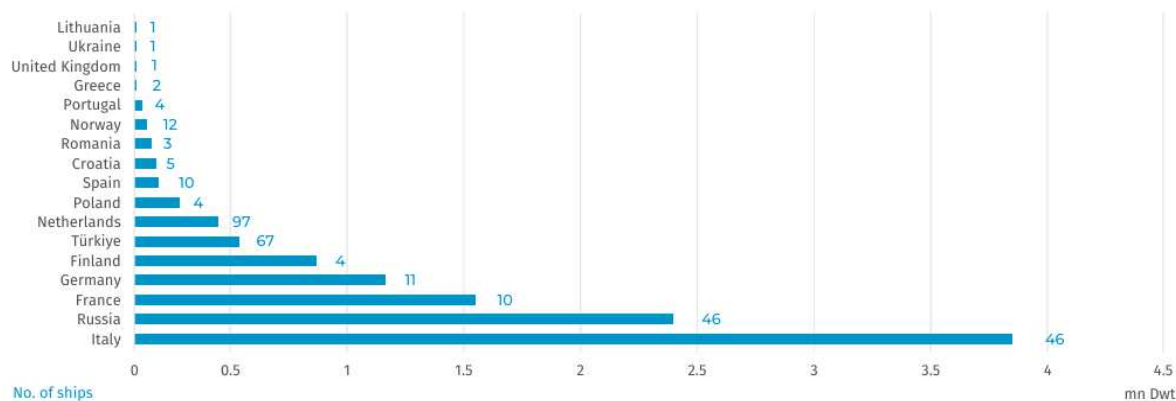
Les commandes de vraquiers ont augmenté de 14 % à 59,1 millions de tpl en 2024, marquant la meilleure année de la dernière décennie. Dans le même temps, les commandes de porte-conteneurs ont plus que doublé à 49,8 millions de tpl et le marché des pétroliers a vu ses commandes augmenter de 67 % à 63,7 millions de tpl.

On note également une augmentation significative des commandes de méthaniers, passant de 77 en 2023 à 108 en 2024 ainsi qu'un doublement des commandes de navires de croisière à 37.

En 2024, la Chine a de nouveau augmenté de façon significative son carnet de commandes, augmentant sa part du marché mondial de la construction navale de 9,7 % (passant à 67,3 %), et consolide sa position dominante au détriment du Japon (-4,3 % à 17 %) et de la Corée du Sud (-5,1 % à 11%).

En Europe, Fincantierir est le plus grand constructeur de navires de croisière au monde avec en carnet 44 grands navires de croisière contre 31 en 2023, soit 50,8 % du carnet de commandes mondial de navires de croisière. Si l'on exclut la Russie, la France a la deuxième place grâce aux Chantiers de l'Atlantique dont le carnet de commandes s'élève désormais à dix unités suite à la commande par Royal Caribbean d'un nouveau navire de croisière à propulsion GNL. En termes de tonnage, cela représente 16,8 % du carnet de commandes mondial de navires de croisière.

Orderbook of European Shipyards at end-2024 (mn Gt)



(Source : BRS Revue annuelle 2025)

Il y avait en 2024 environs 348 chantiers navals opérationnels dans le monde, soit 50 % du nombre d'environ 700 chantiers actifs en 2007. Une importante restructuration de ces chantiers a permis d'en réduire le nombre total, tout en augmentant la capacité de production globale notamment en Chine. Des chantiers dormants sont préparés à être remis en service dans la perspective d'un pic de demande lié à la décarbonation des flottes.



L'Ilma, super-Yacht pour Ritz-Carlton en essais à Saint-Nazaire, livré en juillet 2024.
Son sistership Luminara sera livré à l'été 2025 (Chantiers de l'Atlantique).

LA CONSTRUCTION NAVALE MILITAIRE

Les prises de commandes en 2024 pour l'industrie française de la construction navale militaire ont été importantes dans un contexte général de réarmement. On notera surtout le lancement du programme de remplacement de la capacité sous-marine néerlandaise (RNSC) : remplacement des sous-marins de classe Walrus par quatre sous-marins à propulsion conventionnelle de la famille Barracuda.

Le chiffre d'affaire de 2024 pour Naval Group s'élève à 4,355milliards d'euros. Son activité de construction pour les besoins de la Marine nationale a porté sur les essais à la mer de la première frégate de défense et d'intervention(FDI) Amiral Ronarc'h et la poursuite de la série, la poursuite sur les sites Naval Group de Cherbourg et de Nantes-Indret de la réalisation du programme de sous-marins nucléaires d'attaque (SNA) Barracuda avec les essais à la mer et la livraison du Tourville (3e de la série), le démarrage des études détaillées et la réalisation des patrouilleurs océaniques par les chantiers

Piriou, CMN et Socarenam et la mise sur cale du premier bâtiment au chantier Piriou, et la mise à flot à Saint-Nazaire par les Chantiers de l'Atlantique du 2e bâtiment ravitailleur de forces (BRF) Jacques Stoskopf.



Première sortie à la mer de la FDI *Amiral Ronar'ch* (Naval Group®)

Par ailleurs les programmes en cours de développement se sont poursuivis, notamment la poursuite des études d'avant-projet détaillé (APD) du porte-avions de nouvelle génération (PA-NG) en coopération entre Technic Atome, Chantiers de l'Atlantique et la poursuite du premier marché subséquent du programme de sous-marins nucléaires lanceurs d'engins de 3^e génération (SNLE 3G), avec la découpe de la première tôle.

Le maintien en condition opérationnelle (MCO) des bâtiments de surface et des sous-marins constitue une part importante des activités de la direction Services de Naval Group et des industriels du secteur. On citera par exemple pour 2023 le début des travaux d'études pour la rénovation et mise à niveau (RMV) des frégates de défense aérienne de type *Forbin*, la poursuite des arrêts techniques programmés sur les frégates multimissions (FREMM) en service, l'arrêt technique de 1 mois ½ sur le porte-avions *Charles de Gaulle*, l'arrêt technique des SNA *Suffrenet* et *Duguay Trouin*.

Concernant l'exportation, l'année écoulée a été marquée pour Naval Group par l'armement de la FDI *Kimón* et la mise à flot de la *Nearchos* pour la Marine hellénique, la livraison de la deuxième corvette Gowind® pour les Émirats arabes unis, *El Amarat*, ainsi que les essais en conditions du golfe persique qui se sont déroulés avec succès, la poursuite du contrat des littoral combat ship (LCS) pour la Malaisie (corvettes Gowind®). Par ailleurs, la fabrication des navires de lutte contre les mines pour les marines belge et néerlandaise se poursuit, en collaboration avec Kership et Exail. La première sortie mer de l'*Oostende* (n° 1) s'est déroulée en juillet de même que la mise à flot du *Tournai* (n° 3). On peut noter également la livraison du dernier offshore patrol vessel (OPV) *Cator* au Sénégal par Kership (en coopération avec Naval Group pour le système de combat), les essais en mer du sous-marin Scorpène® *Vagsheer* (n° 6) pour la marine indienne et la livraison du sous-marin Scorpène® *Humaità* (n°2) pour le Brésil et mise à flot et essais du *Tonelero* (n°3).

Dans le domaine des drones et systèmes autonomes, on note la poursuite du contrat d'étude pour des drones *unmanned under water vehicle* (UUV) de combat pour la Marine nationale signé par Naval Group (programme Unmanned combat under water vehicle- UCUV) et la réalisation d'un *unmanned surface vehicle* (USV) de la gamme Seaquest® S par Sirehna et les démonstrations conduites, notamment son embarquement sur une FREMM.



Essais mer du navire de lutte contre les mines *Oostende* pour la marine belge (Naval Group®)

Le chantier Piriou poursuit la réalisation pour le compte de Kership et Naval Group des bâtiments de guerre des mines porte drones (programme rMCM, pour Mine Counter Measure) pour les marines belge et néerlandaise.

Pour leur part, les Constructions mécaniques de Normandie (CMN) ont livré le second landing craft tank (LCT) de 70 mètres pour l'Angola et démarré la construction de la première corvette BR71 Mk2 pour l'Angola. Socarenama livré le second des patrouilleurs outre-mer (POM) pour la Marine nationale, le *Teriieroo a Teriierooiterai*, qui sera basé à Papeete, démarré les essais mer du troisième POM, *Auguste Techer* (les livraisons s'enchaîneront jusque 2025 pour 6 navires au total) et lancé le premier patrouilleur de 46 mètres pour la Gendarmerie nationale, *Le Rozel*. (6 navires prévus).

Enfin, Piriou, CMN et Socarenam ont obtenu la notification du contrat de réalisation fin 2023 et démarré le développement des patrouilleurs hauturiers (sur un design Naval Group). La fabrication du premier navire chez Piriou et du second aux CMN ont débuté.

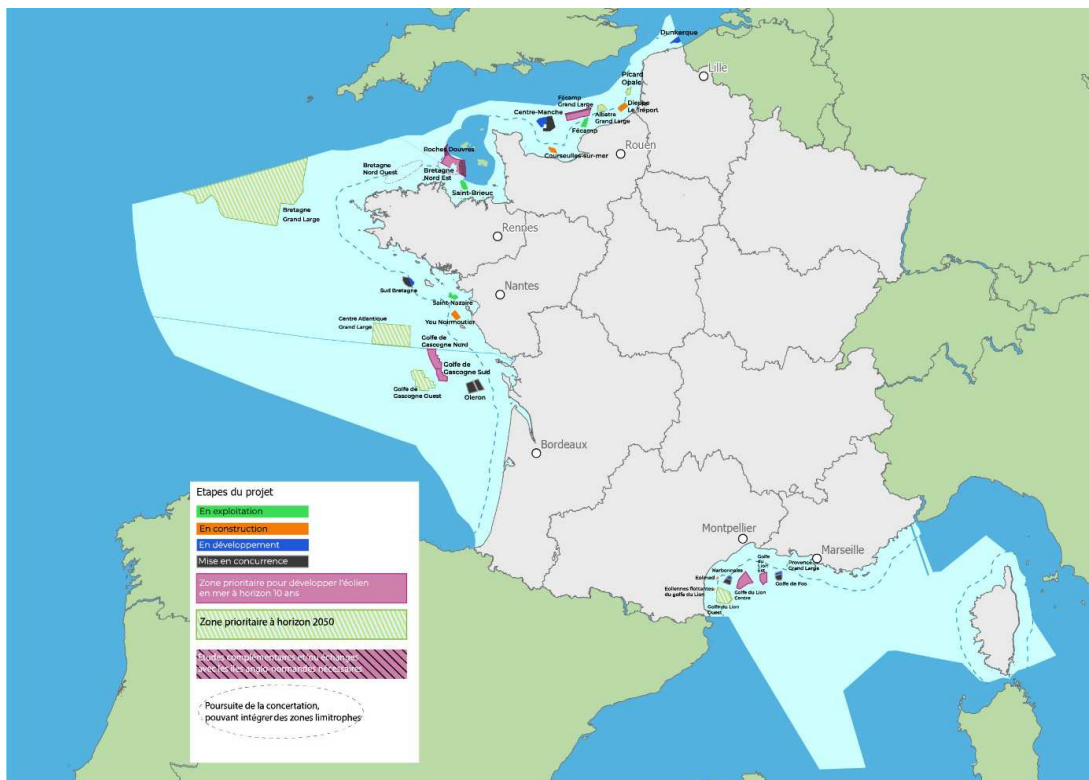
L'ÉOLIEN OFFSHORE

En 2024, le marché de l'éolien offshore a vu plusieurs développements en Europe et en Asie, tandis que les progrès aux États-Unis a été freiné par les incertitudes liées à l'élection présidentielle et aux positions prises par le candidat Trump sur l'accord de Paris. Toutefois, en Europe, les nombres de nouveaux raccordements et les investissements ont subi un infléchissement



Parc éolien de Fécamp (EDF Renouvelables)

En France, avec 3 champs en service (Saint Nazaire, Fecamp, Saint Brieuc), l'éolien en mer a produit en 2024, avec 1474 MW installés dont 658 MW de nouveaux raccordements, près de 4 TWh d'électricité, plaçant la France en troisième position des pays européens pour les nouvelles capacités connectées au réseau pendant l'année. Une ferme pilote a été raccordée fin 2024 en Provence-Alpes-Côte d'Azur pour une puissance de 25 MW, il s'agit du premier raccordement d'éoliennes flottantes de cette envergure.



Carte des projets de champs éoliens en mer (source : RTE)

LA RECHERCHE TECHNOLOGIQUE

Ingénierie maritime (source : ENSTA Bretagne)

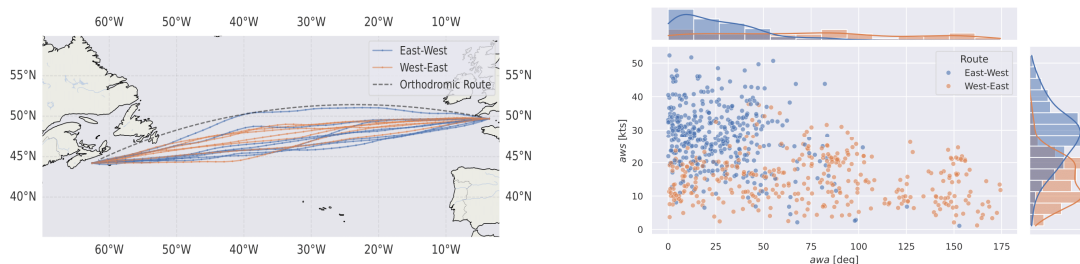
Les organismes d'enseignements supérieur et de recherche membres de l'ATMA mènent de nombreux projets de recherche sur différentes thématiques du domaine de l'ingénierie maritime (propulsion, hydrodynamique, éolien offshore, calcul de structure...). On propose ci-dessous d'illustrer ce sujet au travers de quelques projets actuels et collaboratifs impliquant deux ou plusieurs de ces institutions académiques.

Propulsion Vélique.

La décarbonation du transport maritime constitue une contribution importante à la lutte contre le réchauffement climatique. Parmi les leviers identifiés pour accroître la décarbonation, figurent l'utilisation du vent et le recours à la propulsion vélique. Depuis une dizaine d'années, l'ENSTA Bretagne et l'Ecole Navale mènent des travaux de recherche dans ce domaine, notamment sur des sujets de conception (performances aérodynamiques, dimensionnement structurel) et d'intégration au navire (pilotage, contrôle-commande, déploiement) de différents systèmes de propulsion vélique (propulsion par kite, voiles rigides segmentées).

En particulier, l'ENSTA Bretagne, l'Ecole Nationale Supérieure Maritime et l'Ecole Navale, mènent actuellement le projet SOMOS dont l'objectif est de développer un outil de simulation numérique du comportement global de navires intégrant une propulsion vélique et/ou une propulsion non-conventionnelle.

Des modèles physiques sont élaborés à l'ENSTA, pour simuler les efforts et les interactions entre le système de propulsion vélique et le navire. Ces modèles s'intègrent dans un solveur innovant, capable d'optimiser simultanément plusieurs aspects : les paramètres de conception du navire et du système vélique, les paramètres de contrôle (régime moteur, angle de barre, réglages du système vélique, etc.), ainsi que le routage, simulé sur un large éventail de départs répartis sur une année d'exploitation du navire. Le tout permet une évaluation réaliste des performances de ces navires.



Résolution simultanée du design et du routage d'un navire

Un simulateur de navigation est également développé à l'ENSM, qui intégrera les modèles physiques avec l'ensemble de leurs paramètres (déploiement des voiles etc.). Cet outil servira à former le personnel navigant aux futurs systèmes de propulsion vélique et à évaluer les impacts opérationnels.



Simulateur de navigation développé à l'ENSM

Impacts hydrodynamiques

Les structures en mer (navires, plateformes, fermes éoliennes) peuvent faire face à des sollicitations dynamiques de forte amplitude (paquets de mer, vagues extrêmes, tossage...). Depuis plusieurs années, l'IFREMER et l'ENSTA Bretagne coordonnent leurs efforts pour modéliser et caractériser expérimentalement ces sollicitations, les efforts mécaniques et l'endommagement structurel afin d'améliorer les outils de dimensionnement.

Dans le cadre du projet DIMPACT (thèse de Florian Hulin¹, soutenue en Avril 2024), des travaux de recherche portent sur l'étude des chargements hydrodynamiques induits par l'impact de vagues déferlantes sur les éoliennes en mer. DIMPACT a bénéficié du financement de France Energies Marines, de ses membres et partenaires, ainsi que d'une aide de l'Etat gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du plan d'investissement France 2030 (convention ANR-10-IEED-06-34). Une importante campagne d'essai, réalisée dans le bassin à houle de l'IFREMER, comprenant la conception et l'utilisation d'une maquette segmentée qui permet de mesurer séparément les efforts agissant sur les différentes sections, en contrôlant finement la position et l'inclinaison de la maquette. Le dispositif permet également de prescrire un mouvement à la maquette, afin de simuler les mouvements induits par la houle pour une éolienne flottante. Notons également qu'une méthode d'analyse originale, permettant de compenser les perturbations causées par les vibrations de la maquette (qui sont générées par l'impact de la vague) sur les mesures d'effort, a été mise au point². Cette méthode repose sur l'utilisation des mesures d'accélérations en différents points de la maquette et permet de grandement améliorer la précision des mesures. Cette étude a permis de caractériser finement l'influence de la distance de déferlement δ (distance entre l'endroit où la vague commence à se retourner et la position de la structure), de l'intensité du déferlement (caractérisée par le paramètre Γ introduit par Derakhti et al. (2020)), de l'inclinaison du cylindre et d'une vitesse d'avance sur les chargements hydrodynamiques, et de proposer une formulation empirique pour décrire ces efforts.

D'autres travaux en cours ont pour but d'étudier la réponse hydro-élastique de structures tubulaires lors d'un impact hydrodynamique. Il s'agit des travaux de thèse de Franki Taussé (projet DURAWAVE financé par la région Bretagne et l'ENSTA). C'est une question importante, car le chargement induit par un impact hydrodynamique étant de nature impulsive, évaluer les contraintes générées dans la structure de « manière quasi-statique » n'est généralement pas correct. Les travaux menés comportent un volet théorique, portant sur développement d'un modèle semi-analytique couplant la théorie des poutres d'Euler-Bernoulli à un modèle d'impact hydrodynamique de type Wagner. Une campagne d'essais a aussi été réalisée avec la machine de choc de l'ENSTA. Les résultats obtenus ont montré l'importance de tenir compte des couplages hydro-élastiques dans la modélisation de la réponse structurale.

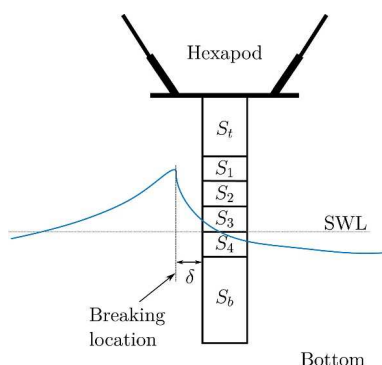
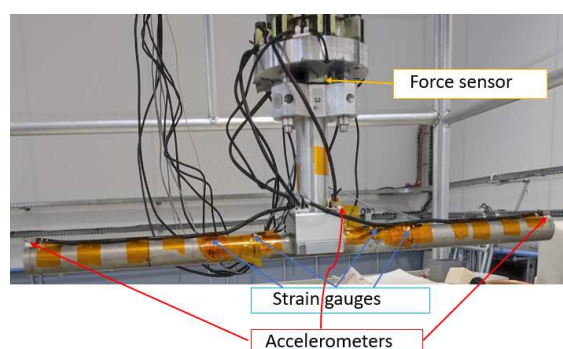


Illustration du dispositif expérimental utilisé pour étudier les chargements de vagues déferlantes, essais réalisés dans le canal à houle de l'IFREMER à Brest.



Maquette instrumentée utilisée pour étudier la réponse hydro-élastique d'un tube soumis à un impact hydrodynamique. Les essais sont réalisés à l'aide de la machine de choc de l'ENSTA.

Cordage d'ancrage des éoliennes flottantes.

Les éoliennes en mer permettent de capter des vents plus forts et plus constants, que celles à terre. Elles réduisent aussi l'impact visuel et sonore puisque placées à plusieurs dizaines de kilomètres du littoral. Dans des profondeurs d'eau modestes, typiquement inférieures à 60m, leur fondation est posée sur le fond. L'éloignement des parcs éoliens de la côte peuvent induire des profondeurs d'eau plus importantes, qui rendent les supports posés trop onéreux : la solution de support flottant est donc actuellement en plein développement. Elle nécessite un ancrage composé de plusieurs lignes destinées à reprendre les efforts de flotteurs de façon flexible, ancrées au fond marin individuellement. Alors qu'elles sont classiquement composées de chaîne acier et/ou de câble en fil d'acier, des cordages en fibres polymères (polyester, polyamide) semblent un meilleur choix de conception des lignes d'ancrage pour une application aux éoliennes flottantes; en effet, le rayon de l'empreinte sur le fond en sera réduit, ainsi que les efforts de rappel sur l'éolienne et au final les coûts de l'ancrage.

Pour ces cordages, les fibres polyamide (Nylon) sont les candidats les plus prometteurs et les plus étudiés actuellement. Plusieurs verrous scientifiques doivent être levés pour leur utilisation de maintien en position des éoliennes flottantes. Un premier verrou est une loi de comportement mécanique cyclique visco-élasto-plastique fiable et implantée dans les codes de simulation des éoliennes flottantes, afin d'évaluer les efforts sur les structures et les mouvements de la plateforme. En effet l'amplitude de ces mouvements est un paramètre clé pour la durée de vie du câble électrique dynamique reliant la plateforme de chaque éolienne à la sous-station en passant par le fond marin. Par ailleurs, une prédiction fine des pics d'efforts permet d'affiner les coûts au-delà du dimensionnement de la ligne elle-même, en impactant également les éléments de reprise d'efforts sur le flotteur (chain-stoppeur). Pour limiter au maximum les coûts de maintenance, les phénomènes mécaniques ressentis par le cordage doivent être anticipés et contrôlés sur une période de 25 ans de service ; ainsi la connaissance de l'endommagement par fatigue et l'allongement des cordages par fluage long-terme sont deux autres verrous scientifiques, indispensables à la validation de cette solution d'ancrage pour les futures éoliennes flottantes.

Ces trois verrous scientifiques ont été investigués lors des projets POLYAMOR (2017-2020), MONAMOR (2020-2023) et poursuivis avec le projet BAMOS (2024-2027) et le projet européen ESOMOR (2024-2027). Les trois premiers projets ont bénéficié du financement de France Energies Marines, de ses membres et partenaires, ainsi que d'une aide de l'Etat gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du plan d'investissement France 2030 (POLYAMOR : convention ANR-10-IEED-0006-16, MONAMOR : convention ANR-10-IEED-06-34, BAMOS : convention ANR-10-IEED-06-34).

FEM, l'ENSTA (site de Brest), l'IFREMER (Brest) et la société de production de cordages synthétiques pour les plateformes flottantes pétrolières et éoliennes BEKAERT-BEXCO (Belgique) ont proposé ensemble une loi de comportement mécanique cyclique d'un cordage d'ancrage optimisé en fibre polyamide, ont caractérisé leur endommagement par fatigue ainsi que leur élongation sous tension constante (fluage) sur une longue période de temps (mesures de 3 ans). La fatigue de ces cordages est due principalement à la friction cyclique de ses composants les uns contre les autres. Cela génère une chaleur, que l'équipe de l'ENSTA mesure au moyen de caméras infrarouge. Cette mesure originale, appelée « auto-échauffement », pour ces matériaux textiles permet de prédire l'endommagement en fatigue avec une campagne expérimentale beaucoup plus rapide et moins coûteuse que les essais cycliques classiques. Cette méthode, encore en développement, a produit des résultats très encourageants.

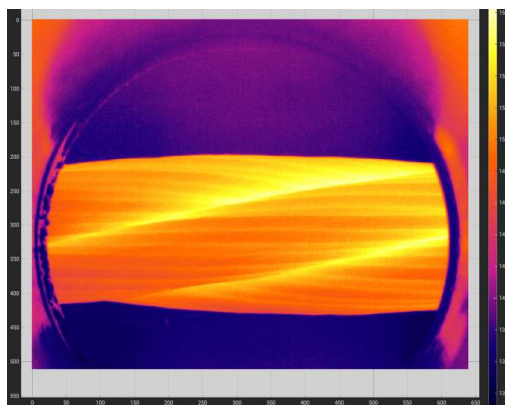


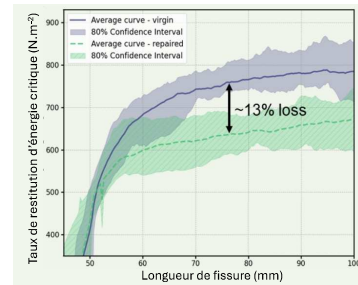
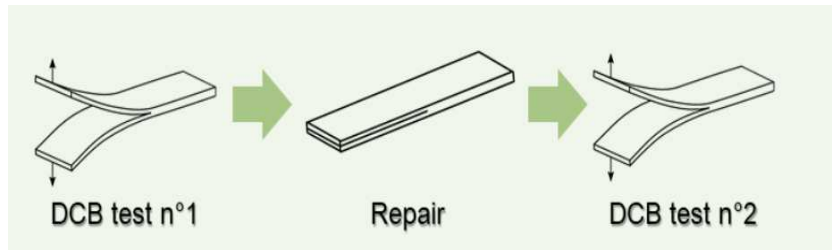
Image par caméra Infra-Rouge d'un sous-cordage en traction cyclique

Réparation des matériaux composites thermoplastiques en fin de vie

Les matériaux composites sont utilisés dans de nombreuses applications marines dans le domaine militaire ou civil. Pour des raisons de coût, les matrices utilisées sont généralement thermodurcissables. Toutefois, des événements extrêmes en services peuvent causer l'apparition d'endommagements au sein de la matrice (fissure dans les plis ou décollement entre deux plis) qui n'impactent pas directement la tenue de la structure, mais peuvent au cours de temps se propager et conduire à une rupture catastrophique. Dans ce cas, il convient alors de remplacer le sous-ensemble afin de garantir l'opérabilité de la structure. Une autre voie consiste à utiliser un matériau permettant une réparation rapide sans ajout de matière. C'est dans ce cadre que s'inscrit ce projet qui a pour objectif d'investiguer l'intérêt d'utiliser des composites à matrice thermoplastiques en intégrant les problématiques de fin de vie (extension de la durée par réparation). Ce projet, financé par l'AID dans l'appel à projet Ingéblue 2022, porte sur deux aspects majeurs : la réparation et le vieillissement. La méthodologie retenue consiste à examiner séparément ces deux aspects avant de les coupler pour une analyse approfondie. Deux types de structures sont investigués. Dans un premier temps, l'analyse se concentre, dans le cadre de la thèse de Mathilde Conan débutée en octobre 2023, sur des défauts maîtrisés sur des éprouvettes de caractérisation : propagation de fissure en ouverture (endommagement inter-plis) et fissuration en traction dans les plis désorientés (endommagement intra-plis). Par la suite, l'étude de la réparation de défauts de type impact basse vitesse représentatifs de ceux rencontrée en service (dans le cadre d'un post-doctorat débuté en mars 2025).

Le matériau étudié est un préimprégné constitué de fibres de carbone et de PPS (polysulfure de phénylène) sous forme de plis unidirectionnels. Le PPS est un polymère semi-cristallin appartenant à la famille des polymères haute performance. Une phase préliminaire a été consacrée à la fiabilisation du procédé de fabrication des plaques C/PPS. La conformité et la répétabilité du processus ont été validées au moyen de différents essais mécaniques. Une fois ce procédé maîtrisé, l'étude du comportement du matériau vis-à-vis de la fissuration, avant et après réparation, a pu être engagée. La démarche suivie est illustrée en Figure 1.

Dans un premier temps, la capacité du matériau à tolérer un endommagement, en l'occurrence la propagation d'une fissure en mode ouverture, est évaluée. Ensuite, une réparation est effectuée en appliquant le même cycle de thermo-compression que celui utilisé lors de la consolidation initiale. L'essai mécanique est alors répété sur l'éprouvette réparée. Cette séquence peut être reconduite plusieurs fois afin d'analyser l'effet de réparations successives. Enfin, l'influence de la prise en eau peut également être explorée en saturant préalablement le matériau en eau de mer avant les essais.



Démarche générale utilisée pour l'étude de l'effet d'une réparation sur la tenue mécanique d'un composite carbone/thermoplastique. Effet d'une réparation

Les premiers résultats obtenus sont encourageants. La valeur du taux de restitution d'énergie critique (qui représente la capacité d'un matériau à résister à l'avancée d'une fissure) est récupérée de près de 90% après réparation. Des résultats comparables sont obtenus sur l'étude de la propagation de fissure en fatigue où la vitesse de propagation d'une fissure n'est augmenté que d'un facteur 2 après réparation.

Notons qu'en parallèle, des échantillons ont été immergés dans de l'eau de mer à des températures variant entre 25 et 80°C. Les résultats montrent que l'absorption d'eau à 80°C atteint une valeur de 0,18 %, ce qui est très faible comparé à d'autres matériaux tels que le C/PA6 ou le C/Époxy. Ce résultat laisse penser que l'absorption d'eau aura probablement peu d'impact sur les propriétés mécaniques.

Dans la suite, la démarche sera appliquée au mécanisme de fissuration intra-plis à la fois nécessitant la mise en place d'un suivi automatique de la fissuration à la fois par analyse d'image et par analyse de signaux acoustiques. En parallèle les premiers travaux sur la réparation de structures impactées (couplant endommagement inter et intra plis) ont débuté par la mise en place du protocole expérimental.

L'HYDRODYNAMIQUE NAVALE

Hydrodynamique navale (Source DGA/TH)

L'activité support aux programmes nationaux

DGA Techniques hydrodynamiques (DGA TH) continue à apporter son soutien aux programmes majeurs en cours de renouvellement de la flotte de la Marine Nationale française : tout particulièrement, le programme de sous-marin nucléaire lanceur d'engins de 3ème génération (SNLE 3G), le programme du porte-avions de nouvelle génération (PA NG) ou le programme de sous-marin nucléaire d'attaque BARRACUDA.



Sous-marin SNLE 3G



Porte-avions (PA NG)



Sous-marin BARRACUDA

DGA TH a continué à mener des études numériques et des études expérimentales sur le programme SNLE 3G. Ces études concernaient à la fois la prédiction des performances manœuvrières visant à

définir le diagramme immersion-vitesse et la prédiction des performances de navigation à faible immersion en présence de houle. Ces essais sont réalisés avec le modèle libre de DGA TH (Darquier et al, ATMA-2017) qui est une maquette navigante autonome et autopilotée en similitude géométrique du vrai bateau.



Essai de SNLE 3G sur modèle libre

Dans le cadre des études de la phase d'avant-projet détaillé du porte-avions de nouvelle génération, DGA TH continue d'apporter son expertise auprès des Chantiers de l'Atlantique pour les prédictions des performances hydrodynamiques du navire. DGA TH a notamment proposé des dessins pour les hélices et des améliorations de géométrie des appendices. DGA TH a aussi réalisé des essais de manœuvrabilité sur une maquette à grande échelle au lac de Castillon (site de DGA Techniques navales) et des essais de tenue à la mer sous houle oblique. Ces essais sont réalisés sur des modèles libres (maquettes autonomes et autopilotées conçues et réalisées par DGA TH).



Essai de manœuvrabilité sur modèle libre de DGA TH au lac de Castillon



Essai de tenue à la mer sur modèle libre de DGA TH

Dans le cadre d'une expertise de phénomène de tossage sur le tableau arrière de frégate, DGA TH a été mis à contribution pour déterminer les conditions de navigation faisant apparaître le phénomène ainsi que pour estimer les pressions d'impacts. Des calculs numériques ont été réalisés et les résultats de calcul ont été corroborés par des essais en bassin de traction à houle.



Essai de tossage sur tableau arrière de frégate

L'activité essais à la mer

Dans le cadre des essais avant mise en service du patrouilleur outre-mer, DGA TH a apporté son assistance aux essais à la mer.



En 2024, DGA TH a aussi participé aux premiers essais à la mer de la frégate FDI Amiral Ronarc'h, notamment aux essais de réglage des lois de conjugaison de pas des hélices conçues par DGA TH, aux essais de vitesses et de manœuvrabilité et aux essais de signature acoustique du bateau.



L'activité études amonts

DGA TH entreprend régulièrement des études prospectives sur de nouveaux concepts en hydrodynamique navale ou sur de nouvelles techniques ou outils d'expertises en hydrodynamique navale parmi lesquelles on peut citer :

l'évaluation de l'emploi de l'intelligence artificielle pour l'identification de coefficients de modèle de manœuvrabilité de sous-marin ou pour le pilotage automatique des navires de surface (garde cap et stabilisation en roulis) ;

le développement de méthodes d'expertises numériques et expérimentales de la trajectoire de bulles autour de la coque de navire pour évaluer leur impact par mer formée sur les gondoles de sonar actif ;

des études préliminaires pour évaluer les capacités de la fabrication additive métal et les capacités de la fabrication additive plastique pour la fabrication de maquettes de carènes ;

l'étude de peinture sur hélice à bord d'un bâtiment école de la Marine Nationale avec la mise en place d'un monitoring de couple et de vitesse de ligne d'arbres sur 3 années entre les hélices des deux lignes d'arbres (une hélice revêtue et une hélice non revêtue).

La coopération

La coopération avec le Royaume-Uni (en application du traité de Lancaster House), portant sur le partage de moyens d'essais de DGA TH et de QinetiQ, est toujours active et a donné lieu à des campagnes d'essais de part et d'autre.

DGA TH est impliqué dans divers groupes de recherche internationaux : Cooperative Research Ship (CRS), Cooperative Research Navies (CRNAV), International Towing Tank Conference (ITTC). La 30ème conférence plénière de l'ITTC a eu lieu à Hobart en Australie fin septembre 2024. Outre les comités historiques (Resistance Committee, Propulsion Committee, Manoeuvring Committee,

Seakeeping Committee, Ocean Engineering Committee, Stability in Waves Committee, Full Scale Ship Performance Committee, Cavitation and Noise Committee, Ice Committee) deux nouveaux comités ont été créés : Wind Powered and Wind Assisted Ships Committee et Group on Overlap (en charge des méthodes hybrides calculs – essais).

Depuis le milieu des années 1990, DGA TH participe aussi au Submarine Hydrodynamic Working Group (SHWG) dont la dernière réunion a eu lieu au bassin du MARIN au Pays-Bas. Ce groupe qui rassemble les principaux acteurs que sont les États-Unis, le Royaume-Uni, l'Australie, le Canada, l'Allemagne et la France a pour objectif de développer des échanges sur les codes numériques de prévisions des performances hydrodynamiques des sous-marins, principalement la manœuvrabilité et la sécurité de la navigation en plongée.

Matériaux et procédés (source : Naval Group/CESMAN)

Aujourd'hui, les travaux de recherche scientifique et technologique sur les matériaux menés dans le domaine du naval de défense sont tirés par des enjeux liés à de nouvelles menaces (ex. lutte champ proche), à de nouvelles conditions d'exploitation des navires (drones, grands fonds), à un besoin grandissant de résilience (risque d'échange de feu et de durabilité à la mer) et au maintien de la posture de dissuasion dans un contexte géopolitique de plus en plus tendu.

Parmi les nouveaux challenges, on trouve l'augmentation continue de la dimension des porteurs et des systèmes embarqués : sous-marins ou porte-avions et notamment de leurs chaufferies nucléaires. Il faut également résoudre l'équation de l'amélioration de la performance couplée à la limitation de l'impact environnemental et humain.

Mais même si on est amené, pour certaines applications particulières de type « drones, grands fonds, discrétion acoustique, lutte contre le fouling... » effectuer des développements spécifiques, l'enjeu n'est pas tant dans la mise au point de nouveaux matériaux et alliages que dans l'efficacité de leur mise en œuvre et leur utilisation.

Depuis plusieurs mois, les études ont été menées dans ce contexte général et dynamisées par les deux grands programmes nationaux : le Porte- Avions de Nouvelle Génération (PANG) et le Sous-Marin Nucléaire Lanceurs d'Engins 3ème génération (SNLE3G). On note également des travaux au profit des drones sous-marins et des sous-marins destinés aux clients internationaux. Il s'agit de travaux de recherche collaborative avec un ensemble de partenaires stratégiques académiques ou industriels (ENSTA, Centrale Nantes, IRT Jules Vernes et M2P, EDF, Airbus, Bureau Veritas, Ifremer ...)

Des études et expertises ont été réalisées sur 7 domaines scientifiques et technologiques : la Fabrication Additive (FA métal et polymère), les matériaux métalliques, les matériaux non-métalliques, la simulation des procédés, les Contrôles Non Destructifs, la lutte contre la corrosion et le fouling. L'année 2024 a été marquée par des avancées significatives dans tous ces domaines et en particulier :

- sur la compréhension des mécanismes de corrosion de structures complexes soumises à des situations d'immersion-émersion. Ce travail va permettre de mettre au point des nouveaux systèmes de monitoring permettant in fine de fournir des informations sur l'état du navire,
- sur nos connaissances de la sensibilité à l'hydrogène d'alliages de titane pour des applications mixtes nucléaire et circuit eau de mer, permettant ainsi de réduire les risques de non-qualité, de sécurité, de maintenance,
- sur l'influence d'un endommagement initial sur les propriétés de tenue à la fatigue des matériaux composites stratifiés en mettant en œuvre une technique de caractérisation innovante par auto-échauffement afin d'évaluer la durée de vie résiduelle du matériau (travaux menés dans le cadre de la Chaire Self-Heating),

- sur la maîtrise du procédé d'infusion des composites à base de verre dans le cadre du projet MONOCLE (MONitoring des prOcédés Composites par infusion pour la navaLE) sous le pilotage de l'IRT Jules Verne en vue d'une industrialisation en 2025,
- sur notre compréhension des phénomènes impliqués dans la réduction des vibrations des structures creuses remplies de matériaux granulaires et dans la manière de modéliser leurs comportements pour des applications telles que les berceaux, les réducteurs, les pales.

On peut mettre en avant également d'importants travaux en 2024 sur la mise au point et la qualification de nouveaux revêtements de masquage acoustique permettant de garantir aux navires des caractéristiques intrinsèques à sa nature militaire : difficilement détectable, robuste, résilient face à l'environnement comme à l'ennemi et résistant au feu pour la sécurité des chantiers.

Dans le cadre du traitement de l'obsolescence de certaines matières, des travaux ont été engagés, sous pilotage de l'IRT M2P, dans le cadre du projet NEPTUNE (NEward chrome Plating Technologies without hexavalent chromium sourcEs), en vue du remplacement du Cr6 (produit CMR touché par la réglementation Européenne REACH).

Le challenge de l'augmentation de la dimension des porteurs a nécessité une attention particulière à la question de la masse embarquée et dynamisé la maîtrise des composites (base carbone) pour se substituer à l'usage habituel des matériaux métalliques, pour les sous-marins, les drones et bientôt également sur bâtiments de surface pour dégager de la masse et créer des espaces pour les capteurs toujours plus nombreux en cohérence avec l'évolution de la menace.

La fabrication additive a franchi une étape stratégique avec le transfert industriel de la technologie WAAM pour le cupro-aluminium, désormais suffisamment maîtrisée pour sortir du périmètre de la R&D, ouvrant la voie de l'industrialisation à d'autres matériaux et procédés dès 2025 : WAAM inox et LPBF inconel.

Enfin, 2024 a été une année riche en travaux de développement dans le domaine de la simulation numérique des procédés de fabrication, d'assemblage et de réparation de structures métalliques mécano-soudées (dont une utilisation anticipée de la méthode des déformations inhérentes pour accéder à une faisabilité industrielle), et également dans la modélisation de la protection cathodique des circuits eau de mer.

Au-delà des travaux habituels d'expertise, un travail important d'accompagnement des fournisseurs a été nécessaire: principalement au niveau des ébauches forgées (en particulier en lien avec les dimensions bien plus importante que celle des programmes précédents) et des produits d'apport de soudage.

Sans être exhaustif, les principales sources de financement des travaux ont été portées en 2024 par la R&D auto financée par Naval Group, les travaux dans le cadre de Projet de Technologie de Défense (PTD) pour le compte DGA, les contrats avec le CEA (principalement dans le domaine des contrôles) et le plan d'investissement d'avenir et France 2030 (pour la Fabrication additive, le composite et la robotique).

Des opportunités offertes par le support aux programmes exports ont également permis de compléter nos travaux par exemple dans les domaines des matériaux composites, du monitoring des structures, de la fabrication additive et de robotisation des procédés.

LA REGLEMENTATION

Organisation Maritime Internationale (OMI)

Deux règlements de l'OMI sont entrés en vigueur en 2024.

La Mer Méditerranée est passée en zone d'émissions contrôlées (SECA) pour les émissions de soufre et les particules. Cette disposition résulte de la résolution MEPC.361, adoptée au MEPC 79 en décembre 2022, qui amende la convention MARPOL Annex VI. Elle est entrée en vigueur au 1er mai 2024, mais prenant effet au 1er mai 2025. La limite pour la teneur en soufre des carburants est abaissée à 0.1% en masse, contre 0.5% hors ECA.



L'interdiction des Heavy Fuel Oil dans les eaux arctiques résulte de la résolution MEPC.329, adoptée au MEPC 76 en juin 2021 et proscrit l'utilisation et le transport des carburants HFO depuis le 1er juillet 2024. Les navires à double coque sont exemptés jusqu'au 1er juillet 2029.

Plusieurs mesures nouvelles ont également été adoptées pendant les MEPC 81 (Mars 2024) et 82 (Octobre 2024) :

- Adoption d'une zone d'émission contrôlées (ECA) dans les eaux arctiques Canadiennes, pour les NOx, SOx, et les particules (entrée en vigueur 1er mars 2026)



- Adoption d'une zone d'émission contrôlées (ECA) en Mer de Norvège, pour les NOx et SOx (entrée en vigueur 1er mars 2026)

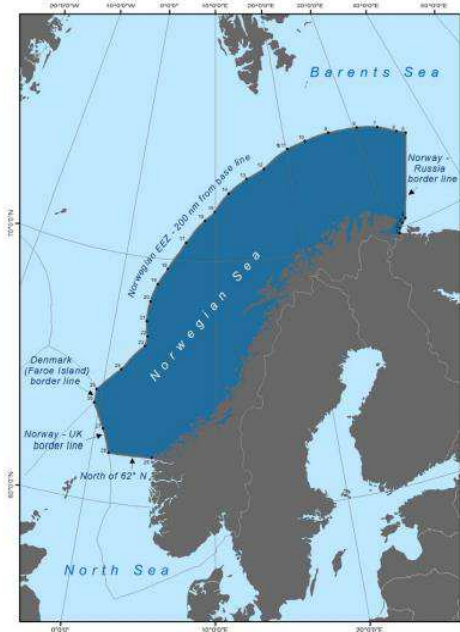


Photo 34-2025

- Discussions sur la stratégie de l'OMI sur la réduction des gaz à effet de serre, les mesures à moyen terme basées sur le marché (Market-Based Measures) avec peu de progrès du fait de nombreuses divergences sur les aspects techniques et économiques.
- Lancement d'une 5e étude OMI sur les gaz à effet de serre avec l'objectif d'un rapport en 2026:
 - Comparaison des émissions avec 2008 (année de référence)
 - Adoption de l'approche « Well to Wake » en remplacement de l'approche « Tank to Wake » des précédentes études
 - Comparaison avec les autres modes de transport

Les comités MSC 108 (Mai 2024) et 109 (Décembre 2024) ont par ailleurs adopté :

- Amendement à la SOLAS introduisant l'obligation de dispositifs de remorquage d'urgence sur les nouveaux navires de plus de 20000 GT (autres que tankers). Entrée en vigueur 2028
- Amendements au code IGF pour les navires utilisant le GNL comme carburant. Entrée en vigueur 2026
- Feuille de route pour le développement d'un Code MASS (Maritime Autonomous Surface Ships) facultatif pour 2025, et obligatoire pour 2030 au plus tard
- Adoption des Directives révisées sur la gestion des cyber-risques maritimes



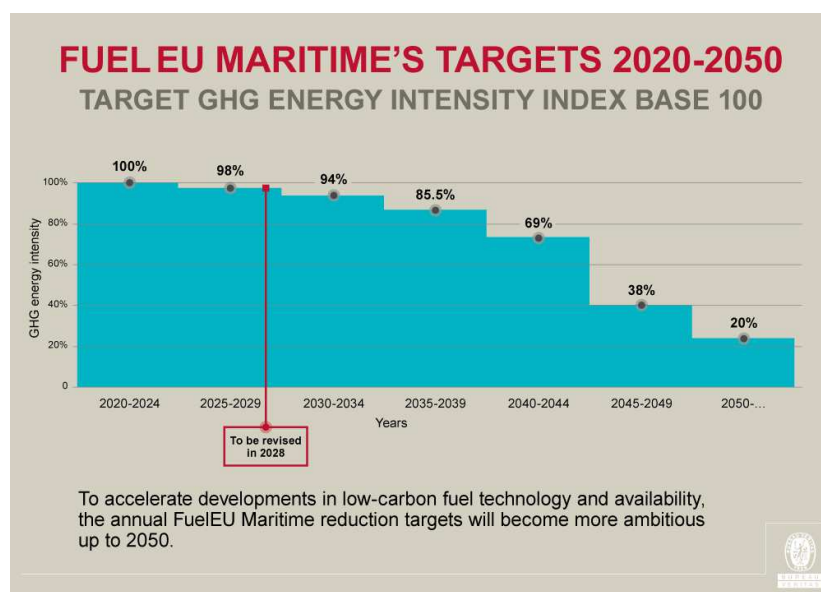
Photo: Rolls-Royce

Enfin, plusieurs travaux se sont poursuivis en 2024 :

- Sous-comité Ship Design and Construction (SDC10), janvier 2024 :
 - Travaux préparatoires à la révision des « Guidelines on alternative design and arrangements » (MSC.1/Circ.1212/Rev.1), pour approbation par MSC 108 (en mai 2024).
 - Rédaction de Guidelines pour les « Emergency Towing Arrangements for ships other than tankers », pour adoption en 2025.
 - Discussion sur une proposition IACS sur l'utilisation des « Remote Inspection Techniques » pour les CloseUpSurveys des navires en service
 - Travaux sur la révision des « Interim guidelines for use of Fibre Reinforced Plastic (FRP) elements within ship structures: Fire safety issues » (MSC.1/Circ.1574). Objectif 2025.
- Sous-comité Pollution Prevention and Response (PPR11), février 2024
 - Rédaction de « Guidance on in-water cleaningsystems » à publier comme document autonome, objectif 2025.
 - Finalisation de « Guidelines on mitigation measures to reduce risks of use and carriage for use of heavy fuel oil as fuel by ships in Arctic waters »
 - Finalisation d'un circulaire « Recommendations for the carriage of plastic pellets by sea in freight containers »
 - Finalisation de « Guidelines on the clean-up of plastic pellets from ship-source spills »
 - Rédaction de « Guidance on best practice regarding recommendatory goal-based control measures to reduce the impact on the Arctic of Black Carbon emissions from international shipping »
 - Rédaction de « Guidelines on recommendatory Black Carbon emissions measurement, monitoring and reporting »

Union européenne

Les directives 2023/957 et 2023/959 sont entrées en vigueur. Les activités de transport maritimes rejoignent désormais le système de quotas carbone EU ETS « Emissions Trading System », bourse d'échange des émissions de GES. En 2024, 40% des émissions sont concernées. Les armateurs ont jusqu'au 1er septembre 2025 pour l'achat des crédits carbone.



Le règlement 2023/1805 FUEL EU MARITIME impose progressivement l'utilisation de carburants renouvelable et bas-carbone dans le transport maritime. Il porte sur 100% du carburant utilisé entre deux ports de l'Union et 50% du carburant utilisé entre vers ou depuis l'Union. Il entre en vigueur en 2026, sur les émissions de l'année 2025. Au 1er août 2024, chaque navire doit soumettre un « plan de surveillance », pour approbation avec le début de la collecte des données au 1er janvier 2025.