

Les challenges de l'électricité dans les mobilités maritimes

Les challenges énergétiques des activités maritimes proviennent en premier lieu des contraintes réglementaires (obligations, taxation) avec désormais l'objectif de la décarbonation. Il y a aussi une perspective beaucoup plus éloignée et qui est moins évoquée que la fin des hydrocarbures fossiles. Tout cela posera immanquablement la question de la disponibilité et du prix des énergies des navires du futur. Depuis 150 ans faire mouvoir un navire, petit ou grand, de commerce ou de service, utilise avec une bonne efficacité de la combustion des hydrocarbures dans les moteurs thermiques. Les alternatives sont peu nombreuses, les carburants issus du vivant (biocarburant, biogaz) ont des limites de production et le vélisque est surtout une solution dans l'hybridité. On peut se tourner vers l'autre grande source d'énergie de notre monde moderne, l'électricité. Par essence c'est une énergie puissante, mais de réseau donc a priori peu ou pas adaptée à des objets et de surcroît mobiles. Pourtant l'électricité est devenue un des nouveaux enjeux du monde maritime en impliquant les armateurs, les constructeurs navals, les ports. Les challenges de l'électricité sont nombreux, c'est le sens du Forum organisé en juin par l'ISEMAR et EDF à Nantes et de l'état des lieux que fait cette Note.

L'électricité à bord

La grande révolution technologique du transport maritime a bien été la motorisation au XIX^e siècle d'abord par la machine à vapeur par la combustion du charbon qui permet mécaniquement de mouvoir les roues à aubes puis les hélices. La seconde révolution est l'usage du moteur thermique basé sur les hydrocarbures au début XX^e siècle. Le fioul a aussi un avantage logistique majeur, car c'est une énergie liquide facilement stockable dans les ports et à bord. La turbine à vapeur à haute vitesse puis le moteur à combustion interne, notamment le diesel à deux temps à basse vitesse transforment l'énergie en mouvement mécanique via des cylindres massifs et avec lui le gigantisme maritime. Le carburant qu'est le fioul lourd est largement disponible et économique comme co-produits du raffinage. Les navires comportent aussi un groupe électrogène produisant avec du gasoil l'électricité nécessaire à bord qui est importante pour les passagers. Dans les années 2000, apparaissent les moteurs dual-fuel pouvant utiliser du fuel et du GNL. L'électricité est

déjà présente dans certaines propulsions. Si les porte-conteneurs, les pétroliers et les vraquiers ont des transmissions directes, d'autres comme les paquebots (hélice, pods), les unités offshore, les brise-glaces ont des moteurs diesels-électriques. Les deux nouveaux de P&O à Calais sont équipés par ce type de motorisation. Enfin, l'électricité à bord peut couvrir des besoins spécifiques : conteneurs reefer, boil off Gas du GNL.

La place de l'électricité aujourd'hui dans les navires est donc dans les besoins des systèmes technologiques (navigation, contrôles, fluides...) embarqués et de la vie à bord (équipage, passagers). La question nouvelle pourrait être est ce que l'électricité peut être une énergie de propulsion ? La réponse actuelle est simple. L'électricité ne peut mouvoir seule que des petits navires. Les vedettes à passagers ou navires de services demandent peu d'énergie, un navire moyen comme un cargo de cabotage déjà beaucoup plus et un ferry a des besoins importants à cause des passagers. Les grands navires, pétroliers, vraquiers et porte-conteneurs en sont exclus sans parler des énergivores paquebots.

Ce que le moteur thermique et les hydrocarbures ont permis de faire, est-il possible de le faire avec l'électricité ? La réponse est simple. A l'heure actuelle l'électricité est possible pour la mobilité principale des navires dans des cas réduits. Elle répondra donc à des demandes spécifiques : puissance sur des temps réduits, autonomie pour des usages économes. Car le problème de l'électricité n'est pas forcément la puissance du moteur (kW), mais le stockage de l'énergie (kWh). Le volume et le poids des batteries sont une contrainte. Leur chargement rapide étant une autre contrainte, en aucun cas elle ne sera comparable à celle des combustibles liquides.

La motorisation électrique totale est réservée à des navires de petite taille comme les unités de travail aquacole, les vedettes touristiques à passagers, les bateau-bus, des navires de services portuaires et des EM (CTV). Pour les navires à passagers, le changement d'énergie peut venir des obligations de zones fréquentées (ex. parc naturel marin) ou de la volonté des autorités publiques de transport non polluant. L'usage dans les services portuaires de l'électricité est la voie de la décarbonation. Des navires tests existent comme une vedette de lamanage à Montoir, une piloline à Sète, un

remorqueur à Anvers. Dans tous ces cas, les distances sont courtes, mais la puissance demandée est importante. Plus éloigné des côtes (distance, état de la mer), le CTV full electric est un défi à relever, Damen en propose un modèle depuis 2024. Pour tous ces navires, la souplesse de la motorisation électrique est l'un des atouts d'usage.

Le passage à une taille supérieure de navire est conditionné par la distance à parcourir. Un énorme navire comme un porte-conteneurs entre Singapour et Rotterdam consommerait en propulsion 12 GWh et aurait besoin de 50 000 t de batteries, un feeder entre Oslo et Rotterdam pour 35 heures de navigation consommerait 350 MW avec l'équivalent de 6000 t de batteries. L'électricité ne peut être une solution de propulsion pour les gros navires à cause de la taille, mais aussi de la distance.

Une catégorie de navire effectue des distances réduites. Pour être clair le tout batterie est réservé à des petits ferries et des bacs comme en Norvège avec une intention forte de décarbonation symbolique. Il s'agit de quelques milles marins pour un fjord, mais on peut voir un peu plus grand avec un navire qui embarque de 5 à 10 MWh de capacité de batterie qui pourra parcourir de 20 à 30 miles marins avant d'être rechargé.

Les navires à passagers *full electric* se multiplient. Depuis 2018, les petits ferries d'une centaine de mètres de la ligne suédo-danoise Helsingborg et Helsingør (5 mn, 8 km) sont convertis à l'électricité avec une puissance de 11 MW. La ligne germano-danoise Puttgarden – Rodby (13 mn, 24 km) dispose depuis cette année d'un ferry électrique de 147 m avec 10 MW. Ces navires sont en fait des gros bacs de mer.

Le stade au-dessus est les car-ferries de grande taille. La compagnie finlandaise Viking Line a un projet de ferry tout électrique entre Helsinki à Tallinn à l'horizon 2030. D'une longueur de 195 m, le projet Helios est conçu pour franchir 43 mn en deux heures. La puissance des batteries sera de 85 à 100 MWh avec une recharge de 30 MW dans chaque port. DFDS envisage vers 2035 un ferry similaire entre Calais et Douvres soit 27 miles nautiques, consommant 8,4 MWh (trajet, manœuvre, réserve) avec un système de batteries de 45 MWh se rechargeant durant l'escale de 45 minutes via une connexion électrique à quai de 30 MW.

Les navires rapides sont aussi concernés. Ils consomment beaucoup d'énergie, mais la coque en aluminium réduit le poids. Le constructeur de Tasmanie Incat, spécialisé dans ce type de production, développe le projet d'un ferry de 130 m (2 100 passagers, 225 véhicules). La première opération commerciale sera la liaison entre l'Argentine et l'Uruguay pour la compagnie

sud-américaine Buquebus, pour une vitesse commerciale de 24 nœuds, le navire disposera de 9 moteurs Wärtsilä de 2 400 kW soit une puissance de 41,2 MWh. Un autre projet concerne la compagnie danoise Molslinjen avec 55 MW de puissance alors que d'autres groupes du secteur des passagers européens sont intéressés par ce type de navire rapide électrique.

L'ONG européenne Transport & Environnement a publié cette année une étude évoquant qu'en Europe sur les 903 navires de plus de 400 UMS de jauge brute et transportant plus de 12 passagers, 20 % seraient déjà aptes techniquement à être électrifiés totalement en 2025. L'organisation estime que l'évolution technologique et tarifaire à la baisse des batteries et le coût supplémentaire de la taxe carbone, les navires techniquement aptes et économiquement rentables pourraient atteindre les 43 % en 2030 et 52 % en 2035. T&E plaide pour une extension probable aux navires de plus de 400 UMS. Les secteurs du ferry européen sont donc la meilleure terre d'accueil de l'électricité et selon T&E 57% des ports concernés par les lignes passagers n'auront besoin que de 5 MW de puissance.

Le défi des batteries

L'électricité est un grand changement pour les navires. Pour faire du neuf notamment pour les petits navires il faut tenir compte d'un changement fondamental. Un moteur électrique plus léger que le moteur thermique, mais un stockage de l'énergie en batteries plus lourd que les cuves de carburants. Cela complique déjà la remotorisation des navires existants et les changements pourraient être complexes et trop lourds en investissement. Les navires électriques seront donc des navires designer pour leur nouvelle motorisation et le stockage des batteries lourdes.

Il y a aussi la question des batteries elles-mêmes. Le défi est simple, améliorer la chimie des cellules pour stocker plus d'énergie dans le même volume. Les progrès viendront notamment de l'industrie chinoise qui représente non seulement la plus grande production, mais aussi la recherche et l'innovation, car au-delà de l'automobile il faut répondre à l'électrification des moyens plus lourds des camions, mais aussi du ferroviaire et du maritime. Les engins lourds avec des batteries sur des bases lithium fer phosphate ou sodium ion moins puissantes unitairement mais moins chères à produire.

La batterie électrique est une nouveauté dans le maritime plus large que les navires full electric. Elle représente une énergie annexe avec l'avantage de la souplesse de puissance, mais aussi sa décarbonation. C'est donc dans l'hybridité que va se faire l'introduction de l'électricité notamment dans les navires intermédiaires. Les batteries

peuvent absorber les pics de demande pour éviter que les moteurs diesel ne tournent en sous-régime, ce qui économise 10 à 15 % de carburant. Dans les manœuvres portuaires, le 100 % électrique répond au zéro émission exigé mais aussi la propulsion ajustée que demande la mobilité des derniers mètres du quai et des manœuvres d'évitement.

Les ferries de Brittany Ferries sont l'exemple de la nouvelle hybridité avec sur les navires équipés 1 152 batteries pesant 130 tonnes donnant une autonomie de 45 minutes environ qui serviront à entrer et sortir des ports. Elles sont rechargées par des groupes électrogènes fonctionnant au diesel ou au gaz naturel liquéfié (GNL) en mer et à quai à Portsmouth en 2026 et à Ouistreham et Saint-Malo en 2027.

Pour terminer sur les batteries, il faut rappeler qu'elles comportent des risques propres qui posent des questions de sécurité pour les navires. Les incendies de voitures électriques rappellent y compris comme cargaison maritime le danger. Le principal est l'emballement thermique et donc un risque d'incendie de toutes les batteries, l'émission de gaz puis un risque d'explosion. Les vibrations et chocs peuvent constituer comme l'air salin et l'humidité des éléments problématiques. Le contexte maritime doit donc être pris en compte dans les équipements avec des innovations notamment dans le refroidissement d'urgence par immersion dans un fluide. Comme dans tous les secteurs maritimes, l'assurance et la classification sont les éléments pour encadrer le risque. Devant le vide juridique, l'OMI doit finaliser un cadre réglementaire. Il faut aussi former les navigants aux innovations de l'électricité.

Électricité produite à bord

Une forme d'électricité à bord qui peut être alternative ou complémentaire réside dans la pile à combustible qui transforme de l'hydrogène stocké en électricité. C'est une solution pour produire le courant à bord que l'on retrouve notamment pour des petits paquebots expéditions. En 2022, le *Viking Neptun* construit par Fincantieri possède un module expérimental de pile à combustible à hydrogène de 100 kW pour produire l'électricité à bord. En 2026, le *Viking Libra* utilisera aussi l'électricité pour sa propulsion.

La question de l'électricité nucléaire à bord des navires civils a été testée dans les années cinquante soixante (USA, Japon, Allemagne) alors que la Russie dispose depuis longtemps de brise-glace nucléaires. En sommeil, la question est relancée avec le développement de petits réacteurs (SMR, small modular reactor) dans plusieurs pays. Cependant les problématiques sont nombreuses : usage de la puissance, gestion des risques, perception de l'énergie. Ce sera néanmoins une des questions du maritime au XXI^e siècle.

La problématique portuaire

La première dimension de l'électricité au niveau des ports est le courant de quai, c'est à dire la fourniture d'énergie à la place des générateurs durant les escales. L'enjeu est de permettre aux navires de couper leurs moteurs auxiliaires fonctionnant au diesel lorsqu'ils sont à quai pour les remplacer par une alimentation électrique terrestre. Dans les années 2010, le courant de quai est introduit comme une solution nécessaire pour réduire les émissions atmosphériques dans les ports avec une norme ISO de 2019 pour garantir à l'interopérabilité mondiale. En revanche, la question de la fréquence reste entière l'Europe fonctionnant en 50 Hz et les Etats-Unis en 60 Hz, cela oblige les navires à pouvoir gérer les deux. Historiquement, les premiers ports équipés sont ceux de Californie en raison de la contrainte légale de l'état américain en 2014. Le port de Hambourg organise un projet pilote en 2016 et celui de Marseille pour les ferries de la Méridionale dès 2017. Depuis, les équipements de poste à quai sont réguliers dans les ports européens, la progression américaine est lente, mais s'accélère pour les terminaux de croisière, la Chine œuvre de son côté. L'équipement européen provient aussi désormais d'une obligation légale. Le *Green deal* politique de 2019 et le paquet « Fit for 55 » en 2021 donnent les objectifs de décarbonation traduits dans deux règlements sur le courant de quai applicables à partir de 2024. Le règlement FuelEU Maritime impose aux navires de croisière et porte-conteneurs de se connecter aux réseaux électriques terrestres dans les principaux ports européens à partir de 2030. À terme, il faudra que l'électricité fournie à quai provienne de sources 100 % renouvelables ou décarbonées. Le règlement AFIR (Alternative Fuel Infrastructure Regulation) impose de fournir en 2030 une alimentation électrique à quai aux porte-conteneurs (+ 100 escales par an), aux gros navires à passagers ferries (+ 40 escales par an) et aux paquebots (+ 25 escales par an).

Les règlements imposent donc la demande et l'offre électriques à quai pour les porte-conteneurs et les navires à passagers. Selon la CLIA actuellement 166 navires de croisière sont déjà équipés pour se connecter au réseau électrique à quai soit 58 % du total de la flotte. Cette part devrait croître rapidement, dépassant les 75 % d'ici 2030, avec 239 navires équipés. Pour les porte-conteneurs mondiaux autour de 20% sont équipés pour se brancher à quai. La part est en forte augmentation pour les nouvelles constructions, le taux d'équipement est passé de 30 % en 2022 à plus de 60 % en 2025.

En matière portuaire, les paquebots et les ferries avaient pris les devants mais à l'initiative de ports pionniers seulement. Pour l'instant il s'agit du courant de quai, mais

la question du rechargement des batteries de l'hybridité va se poser notamment dans le secteur des ferries. La fourniture électrique dans les terminaux ferries et paquebots concerne en général les autorités portuaires, car les sites sont très peu en concession. En revanche, elle va relever des sociétés de manutention dans le cas des terminaux à conteneurs.

Pour la France, le mouvement d'électrification est ancien, mais il faut désormais accélérer le pas. Les premières initiatives ont été faites en Méditerranée sous le nom de « Connexion électrique des navires à quai » (CENAQ) mise en œuvre dans les bassins Est du Port de Marseille, à Toulon en 2024, à Sète en 2025 et à Nice en 2029. L'équipement du Havre concerne trois postes du terminal croisière mis en œuvre 2025-2026. Le terminal conteneurs de Dunkerque est équipé depuis 2020. Le GPM de Nantes Saint-Nazaire va le réaliser pour ses postes rouliers, La Rochelle s'organise pour un poste vraquier. Il y a encore beaucoup de travail, car il faut le faire pour les postes ferries de Calais à Saint-Malo, les quais croisières à Honfleur et Rouen, Cherbourg, Bordeaux, les terminaux conteneurs de Port 2000 et de Fos...

Le défi est en fait européen. Selon une étude commandée par Transport & Environnement (T&E) et confiée au DNV, en 2025, seuls quatre ports parmi les 31 plus importants en Europe ont installé ou engagé plus de la moitié des infrastructures électriques à quai requises pour 2030, seulement 20 % des installations prévues par la réglementation européenne ont été mis en service ou commandés. Les ports d'Algeiras, Livourne, Świnoujście et La Valette sont les seuls à avoir atteint un niveau de conformité supérieur à 50 %. Algeiras et Hambourg se distinguent par leur part importante de connexions déjà opérationnelles. À l'inverse, plusieurs grands ports, comme Anvers, Dublin, Gdańsk ou Lisbonne n'ont engagé aucun projet d'électrification à quai. Rotterdam, Barcelone, Valence, Bremerhaven et Le Havre accusent aussi un retard notable. Les données manquaient à l'ONG pour des ports comme Marseille, Dunkerque, Tallinn ou Le Pirée. Le rapport doute au final de l'équipement européen pour 2030.

Il y a bien un grand défi pour les ports européens avec un mur d'investissements et en toile de fond le modèle économique. Les navires demandent déjà de la puissance : un paquebot 10 à 20 MW, les grands porte-conteneurs 5 à 10 MW, les ferries 2 à 8 MW. À titre de comparaison, la consommation instantanée d'un paquebot à quai est celle d'une petite ville de 30 000 habitants. La première évidence c'est que l'infrastructure portuaire doit être dimensionnée pour supporter de grosses charges sans déstabiliser le réseau électrique

territorial. Les navires dotés de batteries ajouteront de la demande encore plus importante et régulière (5 MW pour une charge en six heures, ou 15 MW pour une charge en deux heures).

La puissance et la rapidité du chargement électrique impliquent des travaux lourds sur les réseaux et postes à haute tension (opérés en France par RTE et Enedis) jusqu'aux quais avec des renforcements électriques locaux pour la gestion des pics de puissance compatible avec les autres consommations locales (villes, industries). Ce qui est appelé le *smart grid* (réseau intelligent) sera la manière d'optimiser les écosystèmes électriques massifs des ports. Il faudra de l'électricité aussi pour les engins de ports, les flottes de véhicules légers des entreprises et les camions des acheminements terrestres, la flotte fluviale. L'espace portuaire sera aussi zone de production avec des parcs photovoltaïques et autres énergies renouvelables. Le port du futur sera électrique.

Les autorités portuaires et les gestionnaires de réseaux ont et auront des travaux importants à faire pour organiser le réseau des câbles et équipements techniques. Au niveau des quais, il y aura le bras articulé ou l'enrouleur du câble haute tension, le système de gestion de la charge et le coffret de connexion de fréquence. Ce sont donc pour un port des dizaines de km de câbles et de 10 à 50 postes à quai à équiper.

Tout cela coûte cher. Les investissements sont lourds (génie civil, réseaux, convertisseurs). Le modèle logique est un partage entre l'autorité portuaire (le réseau principal) et les concessionnaires de terminaux (fourniture finale) s'ils existent. Il faudra donc essayer de facturer les frais d'équipement portuaire, mais en restant dans un tarif admissible. La question d'un tarif unique européen pourrait être envisagée pour éviter des distorsions de concurrence.

Pour les ports, il n'est plus question de raccordements unitaires de 1 à 2 M€ pour un ferry de taille moyenne, mais de l'organisation d'un vaste système électrique. Le port de Rotterdam a budgété 160 M€ pour huit kilomètres de quai avec 35 points de connexion haute puissance. Le port de Calais envisage de 30 à 40 M€ pour six postes à quai ferry. Pour les grands ports français, le coût sera d'une centaine de millions d'euros, étalée sur une décennie, financée par un mélange de fonds publics (UE, État) et de budgets portuaires. L'UE a engagé un processus d'aides (Alternative Fuels Infrastructure Facility) qui a été activé par Haropa, Bordeaux et Saint-Malo.

Paul TOURRET