



Une approche de la décarbonation du pilotage maritime français

Jean-Michel Germa

Président de MGH Energy

L'Organisation Maritime Internationale s'est donné pour objectif de réduire les émissions de gaz à effet de serre du transport maritime de 70 % d'ici à 2050, par rapport à leur niveau de 2008. Les émissions de gaz à effet de serre des navires représentent aujourd'hui 3 % des émissions mondiales annuelles de CO2 et ne cessent d'augmenter. En 2050, elles pourraient atteindre plus de 15% de ces émissions.

Les infrastructures portuaires sont non seulement un passage obligé pour les navires, mais aussi des territoires urbains de très forte densité. L'impact des émissions de gaz à effet de serre y est d'autant plus important.

De nombreuses mesures voient le jour afin de diminuer les émissions de gaz à effet de serre dans ces zones stratégiques. La réglementation sur l'utilisation des fiouls lourds aux abords des ports, l'apparition du courant de quai, ou encore le développement de vedettes de servitude portuaire électriques sont autant d'évolutions qui permettent de limiter la pollution atmosphérique et décarboner l'atmosphère des zones portuaires.

Introduction

Le projet Green Pilot, initié en 2014 par la société MGH Energy, s'inscrit dans cette perspective de réduction des émissions carbonées dans les ports. À partir de la remotorisation d'une vedette de pilotage à propulsion thermique, Green Pilot a consisté à étudier, concevoir, réaliser et mettre en exploitation une vedette de pilotage 100% électrique.



©Brain Child, Boris Proust pour MGH Energy

Cette vedette, la *Maguelonne*, est actuellement en service opérationnel à la station de Pilotage de Sète, qui l'a affrétée¹.

Green Pilot a démontré qu'il est techniquement possible de remplacer une pilotine à propulsion thermique par une pilotine à propulsion électrique sans que les pilotes aient à modifier leurs habitudes de navigation.

Dans la présente note et à partir de l'expérience acquise grâce à Green Pilot, nous avons déterminé les conditions économiques susceptibles d'inciter les pilotes maritimes à opter pour une pilotine électrique plutôt que pour une pilotine thermique. Nous avons ensuite réalisé une étude du marché permettant d'évaluer l'effort financier que les pouvoirs publics devraient mobiliser en vue de réduire les émissions carbonées de la flotte française des pilotines.

Les résultats de ce travail sont exposés ci-après.

Principaux résultats et recommandations

La flotte française de pilotines est estimée à une centaine d'unités et son renouvellement annuel est de l'ordre de dix unités. Considérant qu'environ 40% des pilotines peuvent être électrifiées, le marché français des pilotines électriques est estimé à 4 unités par an. C'est un marché de niche.

La flotte européenne de pilotines est estimée à environ 1 300 unités. En prenant les mêmes hypothèses de taux de renouvellement et d'électrification que

1. Cf article «*Décarbonation du transport maritime : un problème mondial, des actions locales*», dans le numéro 522 de la Revue maritime (NDLR)



©Brain Child, Boris Praust pour MGH Energy

pour le marché français, on peut estimer le marché européen des vedettes de pilotage électriques à une cinquantaine d'unités par an. C'est un marché plus large sur lequel les entreprises pionnières dans la propulsion électrique pourront prendre pied.

À partir d'un ensemble d'hypothèses techniques, financières et environnementales, nous avons comparé le coût actualisé d'une pilotine électrique et d'une pilotine thermique. Pour les besoins de l'étude, nous avons considéré deux pilotines-types, propulsées chacune par deux moteurs totalisant une puissance de 600 CV. Elles sont identiques sauf que l'une est électrique et l'autre thermique.

L'analyse économique montre que la propulsion électrique ne peut être compétitive sans aides dont le montant varie entre 275 000 € et 65 000 € environ par pilotine en fonction du prix du gazole retenu.

L'analyse environnementale montre que pendant la durée d'exploitation, le remplacement d'une vedette thermique par une vedette électrique permet d'éviter l'émission dans l'atmosphère d'environ 1 500 tonnes de CO₂. Le taux de subvention ramené au CO₂ évité est donc compris entre 185 €/tCO₂ et 45 €/tCO₂ en fonction du prix du gazole retenu.

Ce taux est du même ordre de grandeur que celui ayant permis le lancement de la filière des voitures électriques, soit 136 €/tCO₂.

Décarboner 40% de la flotte française des pilotines peut être réalisé en dix ans avec un soutien public compris entre 2,5 à 11 M€ selon le prix de gazole retenu. Pour ce montant de subvention, la réduction permanente des émissions annuelles dans les ports français est de l'ordre de 3 000 tCO₂ par an.

On peut raisonnablement considérer qu'après 10 ans de transition (écologique), le maintien à moins 40% des émissions polluantes de la flotte française des pilotines ne coûtera plus rien au pouvoir public. En effet, il est probable qu'à

cet horizon le coût de la propulsion électrique aura baissé et les taxes appliquées aux carburants fossiles auront augmenté.

Ensuite, grâce à la production industrielle de carburants de synthèse, le taux de décarbonation de la flotte des pilotines française tendra naturellement vers 100%. Cette trajectoire de décarbonation dépassera les ambitions de la stratégie de réduction des émissions de CO₂ de l'Organisation Maritime Internationale (OMI).

Ainsi, grâce à la propulsion électrique, subventionnée dans un premier temps, puis à l'usage des carburants de synthèses, la décarbonation totale des émissions polluantes de la flotte française des pilotines est un objectif facile à atteindre et peu coûteux pour la collectivité. Il contribuerait à l'assainissement de l'atmosphère des ports et favoriserait les entreprises françaises souhaitant exporter leur savoir-faire en Europe.

Il conviendrait simplement que les diverses parties prenantes, la Fédération Française des Pilotes Maritimes, le Ministère de la Mer, le Cluster Maritime, l'ADEME, etc., se réunissent afin de coordonner une action publique (appel à projets, charte, cahier des charges, réglementation, ...) permettant aux stations de pilotage françaises de bénéficier d'une aide ciblée durant les dix prochaines années.

Le marché des vedettes de pilotage portuaire

En France, un marché de niche

Le pilotage portuaire en France est organisé autour de la Fédération Française des Pilotes Maritimes (FFPM). Elle regroupe 30 stations de pilotage, réparties en métropole et dans les départements ou régions d'Outre-Mer. L'ensemble des stations de pilotage exploite une flotte d'une centaine de vedettes rapides de deux types :

- Des vedettes monomoteurs d'une puissance de l'ordre de 200 kW, représentant environ 10% de l'ensemble de la flotte,
- Des vedettes bimotrices d'une puissance de l'ordre de 400 kW pour 90% de la flotte.

Les vedettes neuves sont revendues tous les dix ans environ. On peut donc considérer que le taux annuel de renouvellement est de 10%.

Toutes les pilotines ne peuvent être électrifiées, par exemple parce que leur rayon d'action est trop important ou parce que les infrastructures portuaires ne permettent pas d'implanter une borne électrique de recharge. Dans une première approche, nous avons supposé que 40% de la flotte peuvent être électrifiés.

Dans ces conditions, le marché français des pilotines neuves électriques est de l'ordre de 4 unités par an. C'est un marché de niche.



Il faudrait ajouter à ce marché, le potentiel de remotorisation (refit) de certaines vedettes qui peuvent être électrifiées sans qu'il soit procédé à leur renouvellement. Ce marché n'a pas été analysé dans le cadre de cette étude.

En Europe, un marché plus large

L'étude du marché européen ne porte que sur les pays pour lesquels nous avons pu recueillir des données exploitables : Allemagne, Espagne, Finlande, France, Grèce, Italie, Norvège, Pays-Bas, Portugal et Suède. Dans ces pays, le marché des vedettes de pilotage est estimé à plus de 1 300 unités

En prenant les mêmes hypothèses de taux de renouvellement et d'électrification que pour le marché français, on peut estimer le marché européen des vedettes de pilotage électriques à une cinquantaine d'unités par an.

Comme pour le marché français, le marché de la remotorisation (refit) en Europe n'a pas été analysé dans le cadre de cette étude.

La compétitivité des vedettes de pilotage électriques

Le projet Green Pilot nous a montré qu'il est techniquement possible de remplacer une pilotine à propulsion thermique par une pilotine à propulsion électrique. Nous cherchons maintenant à savoir à quelles conditions économiques les pilotes maritimes auraient un intérêt à opter pour une pilotine électrique plutôt que pour une pilotine thermique. Pour répondre à cette question, nous avons comparé les flux actualisés générés par la construction et l'exploitation d'une vedette thermique et d'une vedette électrique.

Hypothèses de travail

Considérant que les vedettes objet de la comparaison sont identiques en tous points sauf pour ce qui concerne leur moyen de propulsion, seuls les coûts afférents aux chaînes de propulsion ont été comparés, tout restant égal par ailleurs.

Le marché français étant composé majoritairement de vedettes bimotrices d'environ 600 CV (400 kW) de puissance, c'est ce type de navire qui a été pris en compte pour établir les hypothèses concernant le coût des chaînes propulsives, les coûts d'exploitation, etc.

Les informations tirées du projet Green Pilot montrent que les stations de pilotage exploitent leurs vedettes durant une dizaine d'années avant de les vendre sur le marché de l'occasion où elles peuvent être exploitées durant 10 ou 20 années supplémentaires. Afin de traduire cette réalité, nous avons considéré les hypothèses suivantes :

Technologie

Une approche de la décarbonation du pilotage maritime français

- Analyse financière : chaque pilotine (thermique et électrique) est exploitée pendant 10 ans et une valeur vénale égale à 10% de leur valeur à neuf est créditée à la 10ème année (année de la revente).
- Analyse environnementale : la réduction des émissions de particules polluantes grâce à l'utilisation d'une propulsion électrique est cumulée sur une durée d'exploitation de 20 années (10 années d'exploitation avant la revente plus 10 années d'exploitation par le second propriétaire).

Les coûts de construction (CAPEX) et les charges d'exploitation (OPEX) de la vedette électrique de série ont été extrapolés des données concernant le prototype du projet Green Pilot. Ceux concernant la vedette thermique sont issus de données du marché et d'estimations internes à MGH Energy.

Les CAPEX regroupent les coûts de l'ensemble de la chaîne de propulsion embarquée à bord des navires. Pour la pilotine électrique, les CAPEX (moteur, réducteur, batteries, etc.) s'élèvent à 542 000 €. Ceux de la pilotine thermique (moteur, réducteur, réservoir de gazole, etc.) s'élèvent à 154 000 €.

A ces CAPEX s'ajoutent le coût des infrastructures de recharge à quai. Pour une pilotine électrique, le coût de la borne de recharge (150 kW de puissance) à quai s'élève à 90 000 €. Nous avons considéré que son utilisation peut être mutualisée à cinq bateaux différents et avons affecté 1/5ème du coût total à la pilotine électrique, soit 18 000 €. Les coûts de l'infrastructure de recharge des navires à propulsion thermique, la « station-service », ont été considérés comme nuls car ils sont incorporés dans le prix du plein de gazole souté par les navires thermiques.

Les coûts d'exploitation (OPEX) couvrent les frais de maintenance de la chaîne propulsive et les consommations d'énergie.

Les frais de maintenance ont été estimés à partir de l'expérience du projet Green Pilot pour la pilotine électrique. Ceux concernant la vedette thermique sont tirés de données du marché et d'estimations internes à MGH Energy. Ces frais sont de 1 000 €/an pour la motorisation électrique et de 5 000 €/an pour la motorisation thermique.

La consommation annuelle d'énergie a été extrapolée à partir des statistiques de sorties des vedettes de la station de pilotage de Sète qui ont été recueillies et traitées dans le cadre du projet Green Pilot :

- Nombre de sorties annuelles d'une pilotine : environ 800 par an,
- Consommation spécifique de la pilotine thermique : 34 litres de gazole par sortie,
- Consommation spécifique de la pilotine électrique : 160 kWh d'électricité par sortie.

Au moment où nous écrivons ces lignes, les prix de l'énergie, que ce soit les produits pétroliers ou l'électricité, sont très volatiles. Il est par conséquent difficile de faire des projections. Afin d'éviter les biais que pourrait engendrer cette



volatilité durant les dix années d'exploitation, nous avons choisi des hypothèses conservatrices que nous avons jugées probables en l'état de nos connaissances actuelles.

Pour s'affranchir des variations imprévisibles des prix de l'électricité, nous avons considéré que les batteries de la pilotine électrique étaient rechargées par autoconsommation à partir d'une installation photovoltaïque. C'est ainsi que le prix de l'électricité a été fixé à 0,10 €/kWh la première année d'exploitation. Ce prix n'est pas « inflaté » durant les années d'exploitation suivantes.

Pour la pilotine thermique, il nous a semblé nécessaire de considérer deux scénarios de prix du gazole, un scénario dit « économique » et un scénario dit « environnemental ». Le scénario « économique » correspond aux conditions tarifaires dont bénéficiaient les pilotes de Sète en janvier 2022 avant la forte augmentation du premier trimestre 2022 suite à l'invasion de l'Ukraine par la Russie. Le prix du gazole a été fixé à 0,75 €/l la première année et est ensuite « inflaté » chaque année d'exploitation. Le scénario « environnemental » traduit la nécessité de décarboner les activités maritimes. Il se distingue du scénario « économique » par le fait que nous avons ajouté au prix du gazole maritime (actuellement détaxé) le même niveau de taxe que pour le transport terrestre². Le prix du gazole ressort ainsi à 1,64 €/l la première année et est ensuite « inflaté » chaque année d'exploitation.

Enfin, malgré l'instabilité du contexte économique actuel, nous avons fait le choix d'hypothèses macroéconomiques conservatrices. Les flux financiers ont ainsi été actualisés au taux de 6% pour une inflation de 3% l'an.

Approche économique

La figure 1 montre l'évolution des flux actualisés et cumulés de CAPEX et d'OPEX du scénario « économique ». On observe que les économies réalisées pendant la durée d'exploitation d'une vedette électrique (économies liées au coût de l'énergie et au coût d'entretien moins élevés pour une vedette électrique que pour une vedette thermique) ne permettent pas de compenser le surcoût que représente une vedette électrique à l'achat par rapport à son équivalent thermique.

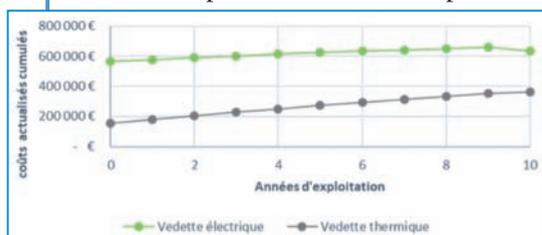


Figure 1: Scénario « économique » CAPEX + OPEX

En effet, dans ce premier scénario, bien que les coûts d'exploitation de

2. Les tarifs du pilotage étant administrés, ce surcoût ne sera pas une charge supplémentaire pour les pilotes. Ils le factureront aux armateurs qui eux-mêmes le feront supporter par les chargeurs et en bout de chaîne par les clients finals. Ce principe de « pollueur-payeur » permet d'envoyer un signal « prix » aux bonnes personnes et de les pousser à modifier leur comportement en vue de réduire leur impact environnemental.

la vedette électrique soient deux fois plus faibles que ceux de son équivalent thermique, la technologie électrique n'est pas compétitive. Tout restant égal par ailleurs, pour la rendre attractive et déclencher une décision d'achat, il faudrait mettre en place des aides de l'ordre de 275 000 € par vedette électrique.

Le scénario « environnemental » illustré en figure 2 fait l'hypothèse que le coût de gazole est majoré de 120% par intégration des mêmes taxes sur les carburants utilisés à la mer que celles supportées par les transports terrestres.

Aujourd'hui ce scénario est encore hypothétique, mais il préfigure les contraintes qui pourraient être supportées par les stations de pilotage dans le cadre

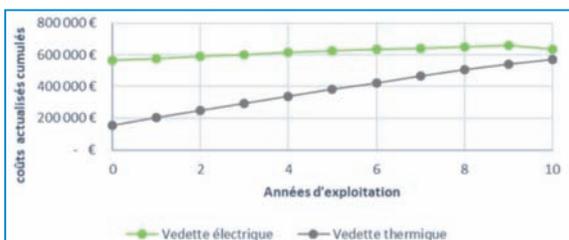


Figure 2: Scénario «environnemental» CAPEX + OPEX

de mesures réglementaires fortes qui seront progressivement mises en place pour réduire les émissions de gaz à effet de serre du transport maritime. On observe dans ce second scénario que le prix du gazole majoré augmente fortement le coût d'exploitation des vedettes thermiques, qui est environ quatre fois plus élevé que celui des vedettes électriques. Cette majoration du prix du gazole ne suffit cependant pas à elle seule à rendre la propulsion électrique compétitive face à la propulsion thermique. Pour rendre la technologie électrique attractive et compétitive, il faudrait mettre en place des aides à l'achat de l'ordre de 65 000 € par vedette électrique.

Nous venons de constater que la propulsion électrique ne peut être compétitive que si des aides sont mobilisées. Le montant de ces aides pour une pilotine type varie entre 275 000 et 65 000 € environ selon les scénarios retenus.

En vue de savoir si ces aides pourraient être efficaces, nous allons maintenant calculer la valeur des émissions de CO₂ évitées grâce à la propulsion électrique. Nous effectuerons ensuite le rapport entre le montant des aides et celui des émissions de CO₂ évitées. Nous comparerons ce ratio avec ceux obtenus dans le transport terrestre qui peut servir de référence vu le grand nombre de véhicules électriques en service. Le paragraphe suivant traite de ces points.

Approche environnementale

Les vedettes de pilotage évoluant dans les ports et à leurs abords directs, elles ont une influence sur le niveau de la pollution atmosphérique portuaire au même titre que les véhicules terrestres.

Alors qu'une vedette électrique ne rejette pas de CO₂, une vedette thermique (du type étudié) rejette chaque année en moyenne 74 000 kg de CO₂ dans l'atmosphère. À titre de comparaison³, une voiture respectant les dernières normes

3. Nous avons pris comme référence une Peugeot 308 de 130 cv que l'on considérera pour cette étude comme un véhicule représentatif du niveau moyen d'émission du parc européen.



anti-pollution émet en moyenne 1 845 kg de CO₂ dans l'atmosphère par an.

Sur les vingt ans d'exploitation (10+10), le remplacement d'une vedette thermique par une vedette électrique permet donc d'éviter l'émission dans l'atmosphère d'un peu moins de 1 500 tonnes de CO₂. Si l'on compare ce chiffre aux subventions nécessaires pour rendre compétitive la propulsion électrique, cette subvention serait de 185 €/tCO₂ pour le scénario « économique » et 45 €/tCO₂ pour le scénario « environnemental ».

À titre de comparaison, lors de la mise en place des mesures incitatives pour l'achat d'une voiture électrique en remplacement d'un véhicule thermique, cette prime s'élevait à 5 000 €, soit 136 €/tCO₂.

Le taux de subvention permettant d'opter pour une pilotine électrique est donc acceptable puisqu'il est du même ordre de grandeur que celui ayant permis le lancement de la filière des voitures électriques. Et, comme pour les voitures, il engendre un effort pour la collectivité qui devrait supporter, d'une manière ou d'une autre, le poids des subventions nécessaires à la décarbonation de la flotte des pilotines françaises.

L'évaluation de ce poids est donnée ci-dessous.

Electrification des pilotines françaises : quel coût pour la collectivité ?

Comme vu plus haut, le marché français des pilotines électriques neuves est de 4 unités par an. Et le montant de l'aide permettant d'électrifier une pilotine est compris entre 275 000 € et 65 000 € environ, selon que le gazole est taxé ou non.

Réduire d'environ 40% la pollution de la flotte française des pilotines peut donc être réalisé en dix ans avec un soutien public de l'ordre de 2,5 à 11 M€, selon que le gazole est taxé ou non. Pour ce montant de subvention, la réduction permanente des émissions annuelles dans les ports français est d'environ 3 000 tonnes de CO₂⁴.

Après 10 ans, si l'on veut maintenir le taux d'électrification de la flotte française des pilotines à 40%, il est nécessaire d'électrifier chaque année quatre nouvelles unités. À cette échéance, le coût de la propulsion électrique aura baissé, notamment du fait de la forte baisse attendue du prix des batteries (de l'ordre de 50%). Il est également très probable que les taxes appliquées aux carburants fossiles auront augmenté fortement. Les utilisateurs auront alors intérêt à opter spontanément pour une propulsion électrique chaque fois que cela sera possible.

On peut donc raisonnablement considérer, qu'après 10 ans de transition (écologique), le maintien à moins 40% des émissions polluantes de la flotte française des pilotines sera consolidé et ne coûtera plus rien aux pouvoirs publics.

Ensuite, à partir des années 2030 et jusqu'en 2050, les pilotines qui n'auront pas pu être électrifiées (60%) pourront bénéficier de la production industrielle et à bas coût de carburants de synthèse, principalement des électrocarburants, qui sont appelés à devenir les plus gros contributeurs à la réduction.

4. Plus 60 tonnes de NO_x, 4 tonnes de CO et 2 tonnes de PM.

Technologie

Une approche de la décarbonation du pilotage maritime français

tion des émissions de gaz à effet de serre de la flotte de commerce mondiale⁵.

Le taux de décarbonation de la flotte des pilotines française tendra alors naturellement vers 100% à l'horizon 2050.

La trajectoire de décarbonation ainsi proposée pour la flotte française de pilotine dépassera les ambitions de la stratégie de réduction des émissions de CO₂ de l'Organisation Maritime Internationale (OMI) qui s'est fixé comme objectif de réduire les émissions de la flotte de commerce mondiale de 70% d'ici 2050.

Conclusion

Les résultats de cette étude montrent qu'il est possible de décarboner la totalité de l'activité du pilotage maritime français à un rythme compatible avec les objectifs de l'Organisation Maritime Internationale, voire plus rapidement.

Dans un premier temps, d'ici 2032 environ, la substitution de la propulsion thermique par la propulsion électrique, chaque fois que cela est possible, permettrait de décarboner environ 40% de l'activité du pilotage maritime. Cette substitution concerne une quarantaine d'embarcations et nécessiterait une aide totale des pouvoirs publics comprise entre 2,5 et 11 millions d'euros en fonction de l'évolution du prix des carburants fossiles. Ramenée aux émissions évitées, soit en moyenne 115 €/tCO₂, cette aide est plus faible que celle qui a prévalu au lancement des voitures électriques. Elle est, en montant global, infiniment plus faible que cette dernière.

Ensuite, à partir de l'année 2032 environ, l'utilisation de la propulsion électrique permettrait de poursuivre la décarbonation de 40% de la flotte française de pilotines, sans qu'il soit nécessaire de faire appel aux aides des pouvoirs publics. Ceci provient du fait, qu'à cette date, le prix des batteries électriques aura considérablement baissé et que les carburants fossiles maritimes seront sans doute soumis à la taxe carbone au même titre que toutes les activités de transport.

Enfin, à l'horizon 2030/2040, les 60% de la flotte des pilotines qui, pour des motifs techniques, ne peuvent pas être équipées d'une propulsion électrique, auront accès aux carburants de synthèse, qui à cet horizon seront plus compétitifs que leurs équivalents fossiles.

Le déploiement de l'aide des pouvoirs publics nécessite certainement la mise en place d'une politique nationale coordonnée entre les administrations concernées et les professionnels.

Les résultats présentés ici sont généralisables à d'autres navires de servitude portuaires (remorqueurs, lamaners, ...) et au marché européen.

5. Ce n'est pas le sujet du jour, mais retenons seulement que les carburants de synthèse ont comme qualités principales d'être miscibles avec leurs homologues fossiles et de pouvoir être utilisés dans les moteurs thermiques sans qu'il soit nécessaire (ou peu) de les modifier, ni de modifier la logistique d'approvisionnement. Ces qualités devraient leur permettre de représenter environ 70% de la réduction des émissions de CO₂ de la flotte mondiale de commerce (in «De la décarbonation du transport Maritime», conférence de Jean-Michel Germa, présentée à l'Académie de marine le 3 mars 2021.)