

# DECARBONATION DU TRANSPORT MARITIME MONDIAL : SIMULATION ENERGETIQUE LONG TERME DE LA FLOTTE MONDIALE EN VUE DE L'ELABORATION DE SCENARIOS DE TRANSITION

Carbon neutral global shipping: generation of transition scenarios using long-term energy simulation of the world fleet

Mots clés : Neutralité carbone ; décarbonation ; transport maritime ; scénarios de transition ; transition énergétique ; modélisation énergétique

Keywords : Carbon neutrality; maritime transport; transition scenarios; energy transition; energy modelling

Laboratoire d'accueil : LHEEA

École doctorale : Sciences pour l'ingénieur

Directeur de thèse : Jean-François Hétét (Prof. HDR)

Co-encadrant de thèse : Pierre Marty (Mcf), Rodica Loisel (Mcf. HDR) du LEMNA

Date de début espérée : Septembre 2023

## CONTEXTE

Si pour le transport terrestre des particuliers, la batterie semble être la solution pour remplacer la plupart des usages, pour le transport maritime il en est tout autrement. En effet, malgré des progrès notables, leur faible densité énergétique (en volume et surtout en masse) limite leur recours, d'autant plus que le transport maritime se caractérise par une part importante de trajets longs, pénalisant pour l'autonomie des batteries.

Or le transport maritime, comme tous les secteurs économiques émetteurs de gaz à effet de serre doit engager sa mue énergétique. Les solutions alternatives au traditionnel fioul sont nombreuses :

- GNL, transitoirement,
- Agro-carburants (bio-GNL, bio-Diesel),
- Hydrogène (vert ou bleu ?) ou carburant de synthèse dérivés (ammoniac, méthanol, eDiesel),
- Nucléaire,
- Batterie du futur

De plus, le solaire et le vélique pourront servir à l'avenir d'énergie d'assistance. Enfin, de nombreux gains d'efficacité énergétique sont encore possibles, que ce soit dans la réduction de la résistance à l'avancement, le routage ou l'optimisation de la machinerie.

Enfin, au-delà des considérations énergétiques, de nombreuses considérations économiques sont à prendre en compte :

- Evolution du prix des carburants et des systèmes propulsifs
- Vitesse de déploiement des nouvelles technologies
- Evolution du trafic mondial et vitesse de navigation qui sont liés
- Disponibilité des carburants dans les ports

Dans ce contexte, imaginer la flotte, décarbonée, de 2050, s'avère être une tâche ardue, bien que nécessaire.

## ETAT DE L'ART

Historiquement parlant, la recherche scientifique a établi que les transitions énergétiques sont lentes [1]. Or la décarbonation au niveau mondial et du secteur maritime en particulier se doit d'être extrêmement rapide [2]. Pour évaluer la possibilité d'une transition énergétique qui soit suffisamment rapide et efficace, nous avons besoin de modélisation pour guider les politiques publiques.

S'il existe une littérature abondante portant sur la modélisation globale énergétique d'un navire (MGEN), les modèles proposés par les auteurs permettent une simulation temporelle qui prend en compte la dynamique du navire, les variations de charge des moteurs ou encore l'évolution des conditions météo tout au long du trajet. Généraliser ces modèles à l'échelle de la flotte mondiale n'est pas envisageable, autant pour des raisons de quantité de travail, de disponibilité des informations que de puissance de calcul.

Il existe cependant de plus en plus une littérature importante évaluant les possibilités de décarbonation du secteur maritime. Les articles adoptent différentes approches. Certains articles essaient d'avoir une approche plus globale [3] ; à l'inverse plusieurs articles se concentrent sur des technologies particulières : pile à combustible hydrogène [4], ammoniac [5]. Différents types d'évaluation sont faites (économique, impacts environnementaux, ressources disponibles).

On peut trouver des articles aussi bien dans la recherche académique [6], [7] que des articles écrits par des institutions internationales [8]. Certains articles proposent déjà des modèles intéressants. Certains se concentrent davantage sur les impacts des politiques publiques [9] ou bien incluent des modèles avec des critères de décisions multiples [10]. [6] vont jusqu'à construire un modèle complexe d'optimisation pour déterminer la configuration optimale en prenant en compte la logistique via les chaînes de valeur mondiales.

Ces approches sont nécessairement plus sommaires que les approches MGEN et négligent forcément un à plusieurs impacts chacun : l'impact de la vitesse ou de l'âge du navire sur la consommation (encrassement de la coque).

Décarboner le secteur maritime demandera un travail interdisciplinaire et aussi requiert beaucoup de dialogues entre des acteurs venant de différents milieux. C'est pour cela qu'il peut être utile de demander aux professionnels du secteur ce qu'ils en pensent. Des articles les interrogent pour savoir selon eux comment procéder et quels leviers possibles d'action ils ont identifiés [11]. [12] a également publié un rapport sur le sujet.

Enfin, les accords internationaux sur le climat donnent la plupart du temps une place particulière aux émissions des transports internationaux. Celles-ci n'étant pas rattachées à un pays en particuliers, aucun budget carbone ne leur est attribué.

## OBJECTIF PRINCIPAUX

Trouver le bon compromis entre modèle navire (MGEN) et modèle de flotte sera la première des grandes plus-values attendue par la thèse.

La seconde sera l'évaluation économique de différents scénarios de transition (exemple : Scénario 1 – Forte pénétration des biocarburants ; Scénario 2 – Amélioration rapide de la densité énergétique des batteries ; Scénario 3 – Développement massif de l'hydrogène ; etc.) avec des analyses de sensibilités autour des différentes hypothèses (évolution du prix des nouveaux carburants ; vitesse de déploiement des nouvelles motorisations ; évolution du trafic mondial) ainsi que des optimisations de la fonction coût. Des éléments de commerce international seront introduits pour refléter le volet de la demande du trafic mondial et les tendances futures de la mondialisation [13].

Pour faire une évaluation économique correcte, il faut donc un modèle de transition qui arrive à concilier différents éléments :

- Aide à la décision en termes de politique publique et d'aide aux industriels
- Impacts économiques
- Précision du modèle énergétique du navire
- Ressources disponibles
- Vitesse de déploiement des nouvelles technologies
- Granularité de la modélisation de la flotte (différents types de navires)

Plusieurs modèles seront développés pour atteindre ces objectifs :

- Un modèle de perte de volume en fonction du carburant : impact sur le volume de cargo transportable et donc sur la taille de la flotte
- Un modèle de vitesse avec calcul, le nombre de rotation, le volume de cargo transporté et in fine la taille de la flotte
- Un modèle de propulsion et d'émission qui tient compte de la grande variété des carburants et motorisations possibles à l'avenir
- Un modèle de retrofit basé sur l'analyse statistique (âge moyen du premier retrofit, type d'opérations effectuées) mais aussi la physique avec une évaluation de l'impact sur la consommation (changement du bulbe d'étrave, adaptation de la motorisation)

L'élaboration des différents scénarios se fera dans les limites d'un budget carbone et une date de neutralité carbone à respecter. Ces limites devront être déterminées par l'analyse bibliographique.

## PROFIL CANDIDAT

Compétences attendues du candidat en thèse :

- Idéalement profil mixte ingénieur énergie et économiste mais une forte motivation et curiosité pour compenser
- Capacités organisationnelles
- Capacités rédactionnelles
- Maîtrise de l'Anglais

Qualités requises :

- Forte autonomie

- Curiosité scientifique
- Esprit d'analyse et de synthèse
- Rigoureux
- Capacité d'écoute - aisance relationnelle - aptitude à travailler en équipe

## PLANNING

Qui ?	Durée	Tâche
Doctorant	0 à 6 mois	Etude bibliographique générale sur la transition énergétique du transport maritime Acquisition de données sur la flotte mondiale Première rédaction du mémoire
Doctorant	6 à 12 mois	Développement des premiers modèles énergétiques dans un langage ouvert (type python)
Doctorant	12 à 18 mois	Développement des premiers modèles économiques
Doctorant	18 à 24 mois	Développement d'un premier outil global et ouvert de modélisation de la flotte
Doctorant	24 à 30 mois	Définition, simulation et analyse de premiers scénarios de transition
Doctorant	30 à 36 mois	Finalisation du mémoire et préparation de la soutenance

La publication de trois articles, dont notamment un de rang A (journal avec comité à revue de lecture) sera attendu durant les 36 mois de la thèse.

## CONTACT

Pierre Marty [pierre.marty@ec-nantes.fr](mailto:pierre.marty@ec-nantes.fr)

Rodica Loisel [rodica.loisel@univ-nantes.fr](mailto:rodica.loisel@univ-nantes.fr)

## LIEU

LHEEA Ecole Centrale de Nantes / LEMNA Nantes Université

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] V. Smil, *Energy Transitions: Global and National Perspectives*. Santa Barbara, California: Praeger Publishers Inc, 2016.
- [2] IPCC, Ed., ‘Summary for Policymakers’, in *Global Warming of 1.5°C: IPCC Special Report on Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels in Context of Strengthening Response to Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*, Cambridge: Cambridge University Press, 2022, pp. 1–24. doi: 10.1017/9781009157940.001.
- [3] G. Mallouppas and E. A. Yfantis, ‘Decarbonization in Shipping Industry: A Review of Research, Technology Development, and Innovation Proposals’, *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 9, no. 4, Art. no. 4, Apr. 2021, doi: 10.3390/jmse9040415.
- [4] M. G. Sürer and H. T. Arat, ‘Advancements and current technologies on hydrogen fuel cell applications for marine vehicles’, *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 47, no. 45, pp. 19865–19875, May 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.12.251.
- [5] F. Y. Al-Aboosi, M. M. El-Halwagi, M. Moore, and R. B. Nielsen, ‘Renewable ammonia as an alternative fuel for the shipping industry’, *Curr. Opin. Chem. Eng.*, vol. 31, p. 100670, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.coche.2021.100670.
- [6] A. Al-Enazi, E. C. Okonkwo, Y. Bicer, and T. Al-Ansari, ‘A review of cleaner alternative fuels for maritime transportation’, *Energy Rep.*, vol. 7, pp. 1962–1985, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.egy.2021.03.036.
- [7] E. A. Bouman, E. Lindstad, A. I. Riialand, and A. H. Strømman, ‘State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review’, *Transp. Res. Part Transp. Environ.*, vol. 52, pp. 408–421, May 2017, doi: 10.1016/j.trd.2017.03.022.
- [8] ‘A Pathway to Decarbonise the Shipping Sector by 2050’, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2021. Accessed: Jul. 25, 2022. [Online]. Available: <https://www.irena.org/publications/2021/Oct/A-Pathway-to-Decarbonise-the-Shipping-Sector-by-2050>
- [9] R. A. Halim, L. Kirstein, O. Merk, and L. M. Martinez, ‘Decarbonization Pathways for International Maritime Transport: A Model-Based Policy Impact Assessment’, *Sustainability*, vol. 10, no. 7, Art. no. 7, Jul. 2018, doi: 10.3390/su10072243.
- [10] J. Hansson, S. Brynolf, E. Fridell, and M. Lehtveer, ‘The Potential Role of Ammonia as Marine Fuel—Based on Energy Systems Modeling and Multi-Criteria Decision Analysis’, *Sustainability*, vol. 12, no. 8, Art. no. 8, Jan. 2020, doi: 10.3390/su12083265.
- [11] O. Nisiforou, L. M. Shakou, A. Magou, and A. G. Charalambides, ‘A Roadmap towards the Decarbonization of Shipping: A Participatory Approach in Cyprus’, *Sustainability*, vol. 14, no. 4, Art. no. 4, Jan. 2022, doi: 10.3390/su14042185.
- [12] ‘Decarbonising Shipping: Setting Shell’s course’, Shell, 2020.
- [13] E. Müller-Casseres, O.Y. Edelenbosch, A. Szklo, R. Schaeffer, D.P.van Vuuren, ‘Global futures of trade impacting the challenge to decarbonize the international shipping sector’, *Energy*, vol. 15, Dec. 2021, 121547, [doi.org/10.1016/j.energy.2021.121547](https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121547).